



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

RCP의 GCM 앙상블을 이용한
농업용 저수지의 가뭄대응능력 변화 분석

Analysis of Drought Response Ability
for Agricultural Reservoirs
using GCM Ensembles of RCP Scenarios

2014년 8월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템 공학부
지역시스템공학전공
박 나 영

RCP의 GCM 앙상블을 이용한
농업용 저수지의 가뭄대응능력 변화 분석
Analysis of Drought Response Ability
for Agricultural Reservoirs
using GCM Ensembles of RCP Scenarios

지도교수 최 진 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 6월

서울대학교 대학원

생태조경 · 지역시스템공학부 지역시스템공학전공

박 나 영

박 나 영의 공학석사 학위论문을 인준함.

2014년 7월

위 원 장

金 成 培₁₂



(인)

부위원장

崔 鎮 容



(인)

위 원

孫 映 歡



(인)



국 문 초 록

기후변화가 가속화됨에 따라 자연재해의 발생빈도가 증가하고 있으며, 특히 가뭄은 식량 생산에 영향을 미치기 때문에 다른 재해보다 큰 피해를 준다. 이를 최소화하기 위해서는 기후변화가 농업용수의 주 공급수리시설물인 농업용 저수지의 가뭄대응능력의 변화를 파악하여 미래의 용수공급 실패 특성을 전망할 필요가 있다. 그러나 미래 기후변화 시나리오의 불확실성이 증대되면서 최근에는 미래에 발생 가능한 전체 범위의 기상을 활용하고자 앙상블 멤버에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 IPCC에서 새롭게 선정한 표준 온실가스 시나리오인 RCP4.5와 8.5를 선정하였고, 기후변화의 불확실성을 고려하고자 GCM의 앙상블 멤버를 활용하였다. DIROM으로 저수량, 저수위, 필요수량 등을 모의하였으며, 사수위 및 10년빈도 저수위를 기준으로 절단수준법을 통해 농업용 저수지의 가뭄대응능력을 평가하였다.

CanESM2의 일별 기상자료를 산출한 결과, 앙상블 멤버별로 차이가 있지만 전반적으로 RCP8.5에서 기온과 강수량 모두 2085s로 갈수록 꾸준히 증가하는 것으로 나타났으며, RCP4.5에서 기온은 미래로 갈수록 증가하지만 강수량은 2085s에서 2055s보다 작은 증가를 보였다. 저수지 유역의 유출량과 저수지 관개지구의 논벼 작물증발산량을 산정한 결과, 논벼 증발산량이 변화보다 유역 유출량의 변화가 더 큰 것으로 나타났으며, 이는 기후변화에 따른 온도 증가보다 강수량 증가가 더 크기 때문으로 판단되었다.

농업용 저수지의 극한가뭄 기상에 따른 가뭄대응능력을 평가하고자 절단수준을 사수위로 설정한 결과, 도척저수지는 현재보다 미래시기에 사수위 발생횟수가 증가할 것으로 예측되었다. 이는 도척저수지의 유효저수용량이 작아 유입량의 시기 편중에 더 민감한 것으로 판단하였다. 사수위 발생 시기는 8월 및 9월에 발생하는 것으로 나타나 현재와 비교하여 지연되는 것으로 예측되었다. 논벼 이앙시기에 가장 많은 용수공

급이 필요한 시기임을 감안할 때 기후변화의 긍정적 효과로 볼 수 있지만, 가을가뭄으로 이어지기 때문에 저수지 운영에 있어 그 다음해의 용수공급 실패 가능성을 포함한 단계별 가뭄 대응책이 필요할 것으로 판단되었다.

농업용 저수지의 설계빈도인 10년빈도 가뭄의 대응 양상을 전망한 결과, 저수위가 하락하는 양상이 현재와 비교하여 지연되는 것으로 나타남에 따라 가뭄심도를 장기간 유지시켰다. 특히, 앙상블 멤버별로 미래 시기에 따라서 유사한 경향성을 나타내는 경우도 있는 반면 상이한 차이를 나타내는 경우도 있어, 앙상블 멤버가 미래의 극한 재해를 잘 반영할 수 있을 것이라 판단하였다.

본 연구의 결과 향후 기후변화로 인한 농업용 저수지 본연의 기능인 안정적인 관개용수 공급의 어려움이 발생하는 양상 및 특성을 파악하고 전망함으로써 추후 발생할 수 있는 용수공급의 실패를 최소화하고 국가 차원 적응 정책의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주요어 : 농업용 저수지, 기후변화, RCP, 앙상블 멤버, 절단수준법
학 번 : 2011 - 21270

목 차

국 문 초 록	i
목 차	iii
List of Tables	vi
List of Figures	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
제 2 장 연 구 동 향	4
2.1 기후변화와 농업수자원	4
2.2 농업가뭄 평가 기법	5
2.3 기후변화의 불확실성	6
제 3 장 연 구 방 법	7
3.1 대상지구 선정	9
3.2 기후변화 시나리오 및 미래 기상자료 구축	9
3.2.1 RCP 시나리오	11
3.2.2 전지구모형	14
3.2.3 상세화 기법	16
3.2.4 앙상블 멤버	17

3.3 저수지 물수지 분석	19
3.3.1 저수지 유입량 산정	19
3.3.2 논벼 수요량 산정	21
3.3.3 저수지 물수지 분석	26
3.4 저수지의 가뭄대응능력 평가 방법 선정	27
3.4.1 절단수준법	27
3.4.2 빈도분석	30
 제 4 장 결과 및 고찰	 31
4.1 미래 기상자료 특성	31
4.1.1 기온 변화 분석	31
4.1.2 강수량 및 강수패턴 변화 분석	35
4.2 저수지 물수지 분석 결과	42
4.2.1 유역 유출량	42
4.2.2 논벼 작물증발산량	48
4.2.3 저수지 유입량 및 방류량 변화	49
4.3 미래의 극한 가뭄 발생에 따른 저수지 대응능력 평가	52
4.3.1 저수지의 가뭄심도 변화 분석	52
4.3.2 저수지의 가뭄 발생 시기 변화 분석	59
4.4 미래의 10년빈도 가뭄 발생에 따른 저수지 대응능력 평가	66
4.4.1 10년빈도 수위 곡선 변화 분석	66
4.4.2 저수지 가뭄심도 변화 분석	75

제 5 장 요약 및 결론	83
참 고 문 헌	87
Abstract	92

List of Tables

Table 3.1 Characteristics for agricultural reservoirs in the study area	9
Table 3.2 List of GCMs in IPCC 5 th Assessment Report	15
Table 3.3 Land cover area of the study watershed	20
Table 3.4 10-days crop coefficient	22
Table 3.5 Deep percolation of irrigation districts for this study	23
Table 3.6 Conveyance losses of irrigation districts for this study ..	25
Table 4.1 Comparison of 1990s (1976~2005) and RCP scenarios for annual mean temperature	33
Table 4.2 Comparison of 1990s (1976~2005) and RCP scenarios for annual precipitation	36
Table 4.3 The number of rain days for 1990s (1976~2005) and RCP scenarios	39
Table 4.4 The number of no-rain duration in March ~ June	41
Table 4.5 Drought reference year for 10-year return period using 1990s data	66

List of Figures

Fig. 3.1 A procedure diagram of the study	8
Fig. 3.2 Location map of the reservoirs for this study	10
Fig. 3.3 Historical and projected total anthropogenic RF (Wm^{-2}) relative to preindustrial (about 1765)	13
Fig. 3.4 Trends in concentrations of greenhouse gases	13
Fig. 3.5 Schematic illustration of concepts in ensemble prediction	18
Fig. 3.6 Concept of estimation of paddy rice water demand	21
Fig. 3.7 Growth stages of rice at paddy fields	25
Fig. 3.8 Fundamental parameters of runs of a series	27
Fig. 4.1 Comparison of monthly mean temperature	34
Fig. 4.2 Comparison of monthly precipitation and change in precipitation comparing to 1990s data	37
Fig. 4.3 Comparison of yearly runoff and change in yearly runoff comparing to 1990s data	42
Fig. 4.4 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Sulsung reservoir)	44
Fig. 4.5 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Docheok reservoir)	45
Fig. 4.6 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Mojeom reservoir)	46
Fig. 4.7 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Janggun reservoir)	47
Fig. 4.8 The average of total paddy rice evapotranspiration (ETc) ..	48
Fig. 4.9 Comparison of average yearly water flow (i)	50
Fig. 4.10 Comparison of average yearly water flow (ii)	51
Fig. 4.11 Estimation of frequency dependent on drought duration by	

truncation level (Dead Water level) in Sulsung reservoir	53
Fig. 4.12 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (Dead Water level) in Docheok reservoir	55
Fig. 4.13 Estimation of frequency dependent on duration by truncation level (Dead Water level) in Janggun reservoir	57
Fig. 4.14 Estimation of frequency dependent on duration by truncation level (Dead Water level) in Mojeom reservoir	58
Fig. 4.15 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (Dead Water level) in Sulsung reservoir	60
Fig. 4.16 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (Dead Water level) in Docheok reservoir	62
Fig. 4.17 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (Dead Water level) in Janggun reservoir	64
Fig. 4.18 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (Dead Water level) in Mojeom reservoir	65
Fig. 4.19 Daily reservoir level in 1990s	67
Fig. 4.20 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Sulsung reservoir	69
Fig. 4.21 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Docheok reservoir	71
Fig. 4.22 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Janggun reservoir	73
Fig. 4.23 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Mojeom reservoirs	74
Fig. 4.24 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (level for 10-yr return period) in Sulsung reservoir	76
Fig. 4.25 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (level for 10-yr return period)	

in Docheok reservoir	78
Fig. 4.26 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (level for 10-yr return period)	
in Janggun reservoir	80
Fig. 4.27 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (level for 10-yr return period)	
in Mojeom reservoir	82

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

2013년 10월과 2014년 3월에 IPCC 5차 보고서의 실무그룹 보고서가 발간되면서 지구온난화가 인간의 활동에 의한 것일 가능성이 95%이상이며, 지구의 평균기온이 지난 133년간 0.85 °C 상승하여 현재 지구온난화는 명백히 진행되고 있음을 밝혔다 (IPCC, 2013). 지구온난화 뿐만 아니라 이상기후 등 기후변화는 극심한 자연재해를 유발시키며 인명 및 재산상의 피해를 지속적으로 발생시킬 뿐만 아니라 산업의 동향마저 크게 바꾸고 있다. 이 중 농업은 특히 기상과 환경에 민감한 산업으로, 최근 2012년 5-6월에 우리나라의 충청도 지역을 중심으로 104년만의 가뭄이 발생함에 따라 가뭄피해 위험이 더욱 부각되었다. 기후변화가 농업 수자원에 미치는 영향에는 기온 상승과 강수량 증가로 나누어 볼 수 있다. 기온 상승은 증발산량의 증가로 이어지며, 강수량의 증가 및 강우 강도 변화는 유효우량의 감소 또는 증가의 원인이 되어 필요수량이 변화한다. 이와 같이 기후변화는 농업용수 수요와 공급의 상호작용에 기인하기 때문에 농업용수의 약 60 %를 공급하는 주요 공급수리시설물인 농업용 저수지에 대한 기후변화 대응능력을 평가하는 것은 농업 수자원 관리 측면에서 필요한 사항이다.

농업용 저수지는 전국에 17,477 개가 축조되어 있으며, 한국농어촌공사 관리 저수지의 약 78 %는 10년빈도 가뭄에도 안정적으로 농업용수를 공급할 수 있도록 설계되었으며 (농업생산기반정비통계연보, 2013), 보편적으로 사용되는 설계한발빈도도 한발빈도 10년 저수지이다. 즉, 10년에 1회 저수위가 사수위까지 내려가는 상황이 발생하여 용수공급의 실패가 나타난다. 하지만 기후변화에 의한 가뭄 및 홍수와 같은 극한 수문사상의 영향이 과거와 다르게 변화함에 따라 저수지의 유입량 및 공급량 변화가 발생하고 저수위의 수위 하강에 따른 사수위 발생 양상

이 달라진다. 작물은 생장시기의 물관리 방식이 다르기 때문에, 충분한 관개용수 공급이 필요한 시점인데 저수지가 충분히 공급을 할 수 없다면 생육 및 수확량에 직접적인 영향을 준다. 저수지는 비관개기 동안 강우를 담수한 후에 관개기에 농업용수를 공급하는 기능을 수행하게 되는데 비관개기에 만수가 되지 않는다면 그 다음해에 가뭄이 발생할 확률이 높아지게 된다. 그러므로 미래 기상자료를 활용하여 저수위 모의를 통한 미래시기의 용수공급 관리방안을 수립해야한다.

용수공급 부족으로 인한 가뭄은 다른 자연재해와 달리 발생시점이 명확하지 않으며, 가뭄심도에 따라 피해 규모의 정도가 광범위하다는 특징을 가지고 있어 저수지의 대응능력을 평가하기 위해서는 가뭄심도 즉, 용수수요량에 대한 공급량의 부족을 추정하는 것이 중요하다. 얼마나 자주 용수부족이 발생하는지, 용수부족이 발생한 이후 얼마나 빨리 정상상태로 회복하는지, 용수부족 결과는 얼마나 심각한 것인지에 대한 검토가 필요하다 (박민규 등, 1999).

국내에서는 기후변화의 적응 정책 마련으로 농업분야의 가뭄대책을 수립하기 위하여 다수의 연구가 수행되었고, 미래 기후변화 시나리오 생성을 위해 전지구모형 (GCM)을 이용하고 있다. 그러나 미래의 경우 모형의 정확성을 검증할 수 없어 미래 전망 및 평가에 불확실성이 크다. 이에 2013년과 2014년에 발간된 IPCC 5차 평가보고서의 실무그룹 (Working group I & II) 보고서에서는 개선된 GCM을 제공하고 있다. GCM 시나리오의 불확실성을 인식하고 보다 적합하고 타당하게 이용할 수 있는 방법을 제시하고자 GCM별 앙상블 시나리오를 산출하였다. 앙상블 시나리오를 사용하면 선택된 GCM이 가지는 극값들이 나타나기 때문에 단일 시나리오를 사용했을 때의 취약함을 보완할 수 있다. 기상·수문 현상이 갖는 불확실성을 계측하고 대비하기 위해 앙상블 시나리오를 활용한 전체범위에 대한 분석이 필수적으로 선행되어야 한다.

따라서 기후변화에 따른 미래의 농업용수 관리방안을 수립하기 위해 미래 기상의 불확실성을 고려하여 저수지의 용수공급실패의 심도 및 발생 시기 변화를 분석하는 것이 필요하다.

1.2 연구목적

본 연구의 목적은 기후변화 대응정책과 연계된 RCP 시나리오와 불확실성을 고려하기 위한 앙상블 멤버를 반영한 농업용수 공급의 주 용수 공급시설물인 농업용 저수지에 대하여 미래에 발생 가능한 용수공급 실패의 심도 변화를 저수지의 가뭄대응능력으로 제시하는데 있다. 이에 대한 세부사항을 정리하면 다음과 같다.

(1) 최근 온실가스 농도 변화 경향을 반영하고 예측 모델에 맞게 해상도 및 탄소순환 모사 등을 업데이트하여 개발된 기후변화 시나리오인 RCP 시나리오를 반영하여 미래의 저수지의 가뭄대응능력 변화를 분석한다.

(2) 미래 기상의 불확실성을 반영하기 위하여 GCM의 앙상블 멤버를 모두 적용함으로써 신뢰도를 향상하여 저수위 하강으로 인한 용수공급 실패 전망을 분석한다.

(3) 저수지 물수지 결과로부터 저수지의 가뭄대응능력을 평가할 수 있도록 용수공급 실패의 발생시기와 지속기간을 검토할 수 있는 절단수준법을 활용하였으며, 절단수준을 사수위 및 10년빈도 저수위로 선정하여 미래 전망구간별 가뭄의 시점과 심도를 산정하고 시나리오에 따른 전망결과의 차이를 비교·분석한다.

따라서 본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 저수위 변동을 전망하고 그로 인해 발생 가능한 용수공급 실패의 심도를 산정함으로써, 기후변화로 인한 기온 및 강수량 증가가 농업용 저수지 용수공급에 미치는 영향 평가를 목적으로 한다.

제 2 장 연 구 사

2.1 기후변화와 농업수자원

기후변화에 따른 농업수자원에 미치는 영향에 대한 연구를 살펴보면, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 4차 평가보고서에서 사용한 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) 기반 미래 기상자료를 활용하여 Park et al. (2009)은 저수지의 유입량과 저수량에 대한 기후변화 영향을 평가하였고, 박근애 등 (2010)은 SLURP 수문모형을 이용하여 기후, 토지이용 및 식생의 변화가 저수지의 유입량 및 저수량에 미치는 영향을 분석하였다. 이 외에도 논벼를 중심으로 소비수량, 필요수량, 10년 빈도 논용수 수요량, 그리고 단위용수량에 대한 연구가 진행된바 있다 (홍은미 등, 2009; 윤동균 등, 2011; 이태석 등, 2012; 유승환 등, 2012; Yoo et al., 2012). 최근에는 IPCC 5차 평가보고서에서 새롭게 제시한 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 활용한 연구가 수행되고 있으며, 정상욱 등 (2012)은 서해안 평야지대 6개소에 대해 논벼의 소비수량을 추정하였고 RCP4.5보다 RCP8.5에서 그 증가가 클 것으로 예측하였다. 박나영 등 (2013)은 농업용수의 주 공급수리시설물인 저수지를 대상으로 RCP 시나리오를 활용하여 유입량과 필요수량 변화에 따른 저수량변화를 RUNS 이론을 통하여 제시하였으며, 남원호 등 (2014)은 기상청 기후변화 시나리오 자료를 사용하여 농업용 저수지의 공급량 및 수요량의 변화를 파악하고, 미래 시기별 히스토그램 및 확률분포 비교를 통하여 미래의 용수공급 불확실성을 분석하였다.

2.2 농업가뭄 평가 기법

가뭄은 연구목적과 분석방법에 따라 다양하게 정의되고 있는데, 논벼를 대상으로 한 농업가뭄 분석에 있어서 주 대상은 강우량과 저수량이었으며 다음과 같은 연구들이 진행되었다. 안병기 등 (1988)은 농업적 가뭄을 분석하기 위하여 한발강도와 한발지속기간을 이용하여 농업한발지수 (Agricultural Drought Index, ADI)를 개발하였고, 박성우 등 (1982)과 김현영 등 (1996)은 과우량과 과우일수를 사용하여 가뭄에 대한 발생빈도와 빈도별 과우일수를 제시하여 농업가뭄을 판단할 수 있는 보조적인 지수로 이용하였다. 김선주 등 (1995)은 강수량의 부족과 증발산량에 관련된 기상 변수들과 같은 농업상의 한발을 일으키는 요소와 농업용 저수지의 유연면적, 관개면적, 저수량 등의 인자를 사용하여 관개용 저수지의 한발지수를 제안하였다. 김선주 등 (1998)은 강우발생에 의한 기상학적 가뭄과 저수지의 저류량에 의한 수문학적 가뭄을 접목하여 확률통계학적인 해석을 통해 관개용 저수지의 용수공급지수 (Irrigation Reservoir Water Supply Index, IRWSI)를 제시하였으며, 저수지 가용저수량과 빈도 개념을 적용한 농업가뭄 분석 및 평가모형을 개발하였고 농업가뭄지수 (ADIP; Agricultural Drought Index for Paddy fields)를 정의하였다 (장민원 등, 2000). 박기욱 등 (2006)은 가뭄지수 중 농업가뭄을 반영하는 지수를 선정함에 있어 농업용저수지 저수율, 표준강수지수, 평년강우비율 및 무강우일수를 선정하여 농업가뭄 단계 구분을 실시하였다. 박민지 등 (2011)은 취수원, 농업용 저수지, 댐 등의 수자원 가용능력을 고려한 수문학적 가뭄지수 (Water Availability Drought Index)를 개발하였다.

2.3 기후변화의 불확실성

미래 기후변화에 따른 수자원 영향을 정량적으로 제시하기 위해서는 기후변화 시나리오를 사용하는 것이 가장 영향력 있는 도구이지만, 모의 정확성을 검증하기 어렵기 때문에 미래 전망 및 평가에 대한 불확실성이 크다. 따라서 사용될 모델의 특성 및 불확실성을 평가하고 줄이려는 노력이 선행되어야 한다. 이를 위해 미래에 발생할 수 있는 시나리오를 기반으로 한 수자원 분야 연구들이 수행되었고 다음과 같다. 강동현(2007)은 GCM 모의를 통한 6개 기후변화 시나리오를 생성하고 이를 금강 유역 용담댐과 대청댐의 운영 모의에 적용하여 용수 부족량을 산정하였고, 서승범(2011)은 A2 배출 시나리오와 4개의 GCM을 조합하여 기후변화 시나리오를 생성한 후 K-nn 가중치 부여 기법을 적용하여 한강 유역의 미래 물부족량을 전망하였다. 기후변화의 불확실성 반영을 위해 다수의 온실가스 배출 시나리오와 GCM을 앙상블 조합하여 생성한 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 유량변화와 물수급 전망을 하였다(김초룡, 2013). Vicuna et al. (2007)은 개선된 CalSimII 모형을 이용하여 두 개의 온실가스 배출시나리오와 2개의 GCM을 조합한 기후변화 시나리오를 적용하여 21세기 캘리포니아 유역의 유출을 전망하였으며, Minville et al, (2010)은 캐나다 퀘벡지역의 페리본카강 유역을 대상으로 ResSim 모형에 10개 기후변화 시나리오를 적용하여 시나리오별 저수지 용수공급 취약도를 산정하였고 기후변화로 인한 저수지 운영에 대한 불확실성을 비교하였다. Islam et al. (2005)은 일본 도쿄의 톤강 유역을 대상으로 12개 가상 기후변화 시나리오를 CROPWAT 모형에 적용하여 시나리오별 가뭄지수를 산정하고 이를 장래 용수공급 측면에서 비교·분석하였으며, Raje et al. (2010)은 인도의 마한디강 유역에 9개 기후변화 시나리오를 이용하여 SOP(Standard Operating Policy)에 따른 저수지 운영능력 지수를 산출하였다.

제 3 장 연 구 방 법

본 연구에서는 IPCC 5차 보고서에서 채택한 기후시나리오인 RCP 시나리오와 GCM의 불확실성을 나타내는 앙상블 멤버를 바탕으로 생성된 기상자료를 활용하여 기후변화에 따른 미래시기의 농업용 저수지의 가뭄대응능력을 평가하기 위한 방법은 다음과 같다. 첫 번째로 CCCma (Canadian Center for Climate Modeling and Analysis)에서 제공하는 CanESM2 (The Second Generation Earth System Model)를 바탕으로 편의보정 (Bias correction)을 활용하여 기후변화자료를 산출하였다. 두 번째로 산출된 기상자료와 저수지 물수지 분석 모형인 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)을 이용하여 일별 저수위, 저수량 등을 모의하였다. 마지막으로 저수지의 가뭄대응능력을 평가하기 위한 방법으로 절단수준법을 선정하여 용수공급의 실패에 따른 가뭄의 위험성을 기준수위 (truncation level) 설정에 따라 가뭄심도와 발생시기의 변화를 분석하였다. 절단수준은 극한 기상에 따른 미래의 저수지 대응능력을 검토하고자 사수위로 선정하였으며, 일반적인 농업용 저수지의 설계빈도인 10년빈도 저수위 또한 절단수준으로 선정하여 기후변화에 따른 저수지 설계빈도 변화를 검토하고자 하였다. Fig. 3.1은 본 논문의 연구 방법을 흐름도로 나타낸 것이다.

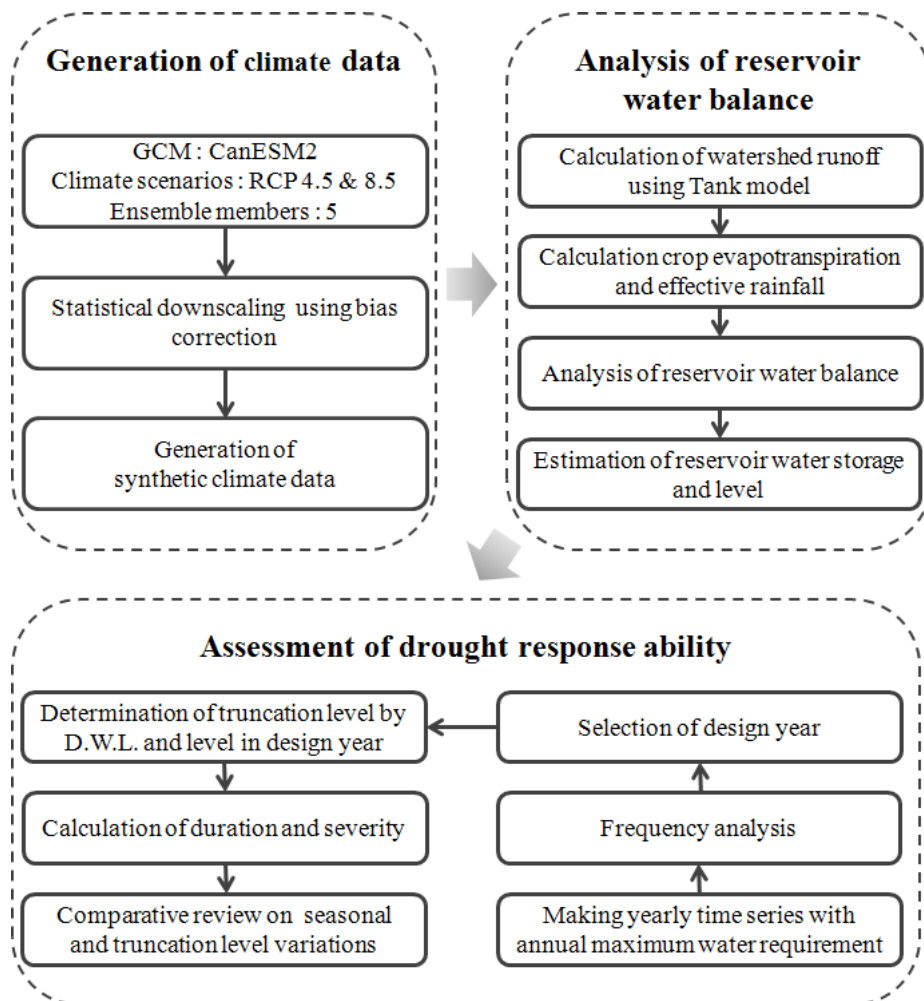


Fig. 3.1 A procedure diagram of the study

3.1 대상지구 선정

본 연구에서는 우리나라의 대표 평야지대인 이천을 중심으로 농업용수 공급을 목적으로 준공된 저수지를 선정하였고, Table 3.1은 본 연구에서 선정한 각 저수지의 유역면적, 관개면적, 유효저수용량 등의 기초자료를 나타낸 것이다. 대상저수지는 기후변화로 인한 미래의 기상 상황을 동일하게 고려하기 위하여 이천축후소가 지배축후소인 저수지 중에서 저수지의 특성에 따른 가뭄대응능력을 평가하고자 유역면적 및 관개면적, 유효저수량이 상이한 저수지 네 곳을 선택하였다. 설성저수지는 유역면적대비 관개면적이 1.8로 관개면적이 큰 저수지이며, 도척저수지는 유역면적 대비 유효저수용량이 작은 저수지이다. 장군저수지는 유역면적이 2,066 ha로 유역면적대비 관개면적이 11.0으로 유역면적이 큰 저수지이며, Fig. 3.2는 대상저수지의 위치를 나타낸 것이다.

Table 3.1 Characteristics for agricultural reservoirs in the study area (RIMS, <http://rims.ekr.or.kr>)

Reservoir name	Watershed area (A)	Irrigated area (B)	Effective storage capacity (C)	(A) / (B)	(C) / (B)
	(ha)	(ha)	(10 ³ m ³)		(10 ³ m ³ /ha)
Sulsung	616	340	858	1.8	2.5
Docheok	980	195	701	5.0	3.6
Janggun	2,066	188	706	11.0	3.8
Mojeom	857	179	1,492	4.8	8.3



Fig. 3.2 Location map of the reservoirs for this study

3.2 기후변화 시나리오 및 미래 기상자료 구축

3.2.1 RCP 시나리오

2007년 IPCC 4차 기후변화 평가보고서 발간 이후, 2013년에 실무그룹 I (Working Group I, WG I)은 IPCC 제5차 평가보고서(AR5)를 발표하였으며 기후과정의 이론 연구 및 기후모델을 이용한 모의 등 다양한 과학적 분석결과를 근거로 기후변화에 대한 새로운 증거들 및 미래 전망한 결과를 제시하였다. 5차 기후변화 평가보고서에는 새로운 시나리오인 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP)가 세계기후연구프로그램 (World Climate Research Programme)의 결합모델 상호비교 프로젝트 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)의 프레임워크 아래서 새로운 기후모델을 이용하여 모의를 수행하는데 사용되었다. 종래의 순차적인 접근방법인 SRES 시나리오와 달리 RCP 시나리오는 기후, 대기, 탄소 순환의 예측과 온실가스 배출 및 사회 경제적 변화를 평행하게 접근함으로써 정보전달의 시간 지연 문제점을 보완할 수 있어 더 나은 기후예측이 가능하다 (국립기상연구소, 2011). RCP 시나리오에는 4종이 있으며, 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우 RCP8.5, 지구가 회복력을 가질 수 있는 최대 한계값인 RCP2.6, 그리고 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우인 RCP4.5/6.0으로 구성되어 있다. 이 숫자는 복사강제력을 의미하며 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 나타낸다. 즉, RCP2.6은 2.6Wm^{-2} , RCP4.5는 4.5Wm^{-2} 등 각각 1750년을 기준으로 한 2100년 총 복사강제력으로 정의하며, Fig. 3.3은 제4차 평가보고서에서 사용되었던 SRES 시나리오와 비교하여 4종 RCP 시나리오가 2100년까지 복사강제력이 변화하는 것을 나타낸 그림이다. RCP6.0과 RCP8.5의 경우 복사강제력이 2100년까지 정점에 도달하지 않지만 RCP2.6의 경우에는 최대를 이루었다가 감소하고, RCP4.5의 경우에는 2100년까지 안정화된다. 이는 21세기의 다양한 기후정책을 포함하고 있

기 때문에 지속적인 증가추세만을 나타내지 않음을 표현한다.

Fig. 3.4는 기후변화를 야기하는 대표적인 온실가스가 2100년까지 변화하는 양상을 나타낸 그림이며, 2100년까지 약 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0), 936 ppm (RCP8.5)에 도달하는 것으로 가정된 CO₂ 농도를 기준으로 RCP 시나리오가 모의된 것이다. CH₄와 N₂O의 농도를 고려하면 유효 CO₂농도는 475 ppm (RCP2.6), 630 ppm (RCP4.5), 800 ppm (RCP6.0), 1313 ppm (RCP8.5)이다. 특히 RCP8.5의 경우, 통합모델들에서 공급되는 것과 같은 가정된 CO₂ 배출량을 이용하여 추가적인 CMIP5 ESM (Earth System Model) 모의가 수행되어 2300년까지 시나리오 제공이 가능할 것으로 보인다.

현재 CanESM2의 자료는 RCP2.6/4.5/8.5에 대해서 제공되고 있으며, RCP2.6 시나리오의 경우 현실에서는 실현 불가능한 극한 시나리오이기 때문에 (KMA, 2012), 본 연구에서는 제외하고 RCP4.5와 8.5를 활용하였다.

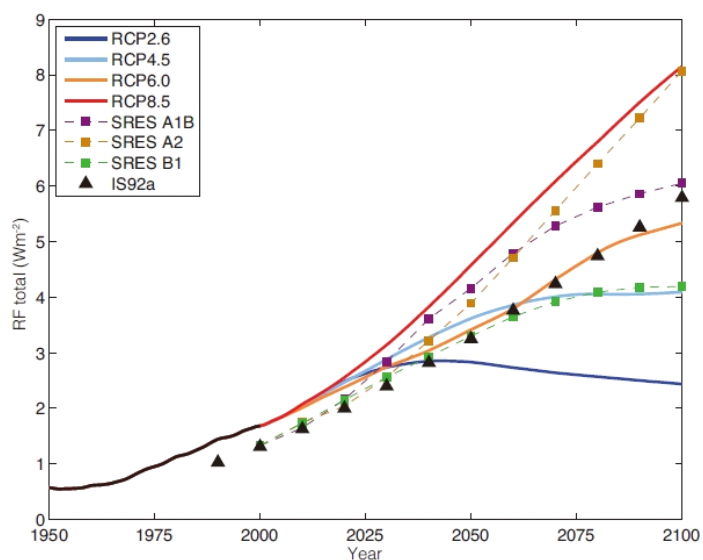


Fig. 3.3 Historical and projected total anthropogenic RF (Wm^{-2}) relative to preindustrial (about 1765) (IPCC, 2013)

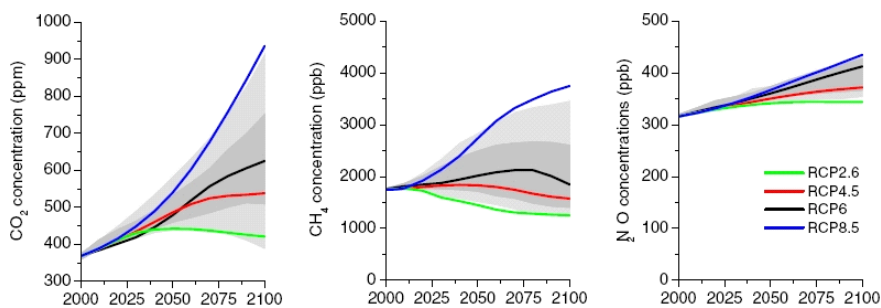


Fig. 3.4 Trends in concentrations of greenhouse gases (IPCC, 2014)

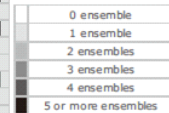
3.2.2 전지구모형(Global Circulation Model, GCM)

GCM은 다양한 에너지원에 대한 열역학을 기반으로 대기와 해양 등에서 물리적인 운동과 변화를 모의하는 수치모델이며, 현재 기술수준에서 장기 기후 예측 및 기후변화 전망에 있어 가장 영향력 있는 도구이다.

본 연구에서는 CMIP5에서 제공하고 있는 모델 중 CCCma의 CanESM2를 선정하였다. CCCma에서는 AGCM1 (The first generation atmospheric GCM)을 시작으로 현재 RCP 시나리오 기반 CanESM2까지 기후 모델을 발전시켜왔으며, 우리나라에서는 이 기관에서 제공하는 CGCM2 및 CGCM3 등의 산출물을 바탕으로 수자원과 관련한 다양한 연구에 적용한 바 있다 (임혁진 등, 2006; 최대규 등, 2010; 이태석 등, 2012; Yoo et al., 2012). 또한 일사량 등의 추가적인 기상요소자료와 365일 자료를 제공하고 있어 미래 기상자료로 활용이 가능할 것으로 판단되었다. CanESM2는 대기와 해양의 순환모델인 CanCM4 (The Fourth Generation Atmospheric General Circulation Model)와 육상과 대기 사이의 탄소 순환을 모의하는 CTEM (Canadian Terrestrial Ecosystem Model)이 결합된 GCM으로, 토지이용변화를 포함하여 육상의 주요 생태계 과정을 모의하기 때문에 향상된 미래 기상자료를 기대할 수 있다 (Chylek et al., 2011). IPCC 5차 평가보고서에서 활용된 GCM 현황을 Table 3.2에 정리하였다.

Table 3.2 List of GCMs in IPCC 5th Assessment Report (IPCC, 2013)

Model/Variable	tas	psi	pr	clt	hurs	huss	evspsbl	rsut	rlut	rtmt	rsdt	mro	mrso	tsl	ta	ua	msft.yz	sos	st	snc	tas_day	pr_day
ACCESS1-0																						
ACCESS1-3																						
bcc-csm1-1																						
bcc-csm1-1-m																						
BNU-ESM																						
CanESM2																						
CCSM4																						
CESM1-BGC																						
CESM1-CAM5																						
CESM1-WACCM																						
CMCC-CESM																						
CMCC-CM																						
CMCC-CMS																						
CNRM-CM5																						
CSIRO-Mk3-6-0																						
EC-EARTH																						
FGOALS-g2																						
FIO-ESM																						
GFDL-CM3																						
GFDL-ESM2G																						
GFDL-ESM2M																						
GISS-E2-H-CC																						
GISS-E2-H-P1																						
GISS-E2-H-P2																						
GISS-E2-H-P3																						
GISS-E2-R-CC																						
GISS-E2-R-P1																						
GISS-E2-R-P2																						
GISS-E2-R-P3																						
HadGEM2-AO																						
HadGEM2-CC																						
HadGEM2-ES																						
inmcm4																						
IPSL-CM5A-LR																						
IPSL-CM5A-MR																						
IPSL-CM5B-LR																						
MIROC5																						
MIROC-ESM																						
MIROC-ESM-CHEM																						
MPI-ESM-LR																						
MPI-ESM-MR																						
MPI-ESM-P																						
MRI-CGCM3																						
NorESM1-M																						
NorESM1-ME																						



3.2.3 상세화(Downscaling) 기법

GCM의 미래 기상자료를 직접 이용한다면 상대적으로 유역 크기가 작은 농업용저수지에 적용하기에는 일부 한계가 있기 때문에 상세화가 필요하다. 상세화 기법은 역학적·물리적 과정을 모두 반영한 지역기후 모형 (Regional Climate Model, RCM)을 이용한 방법과 광역기후자료에서 상대적으로 정확하게 예측한 변수를 이용하는 통계적인 방법으로 나눌 수 있다. 통계적인 방법에는 전이함수, 일기분류, 기상발생기, 편의보정 기법이 있다.

현재의 RCMs는 특히 극한기후 현상에 대해서 모의수준이 낮은 상태이므로, 관측과 모델 간의 존재하는 편의를 보정하여 모의하는 것이 미래의 극한 전망에 대한 불확실성을 보다 줄일 수 있을 것이라 판단된다. 따라서 본 연구에서는 편의보정 기법(Bias correction)을 이용하여 일별 최고, 최저, 평균 기온 및 강수량, 습도, 풍속, 일조시간 등 미래 기후변화 자료를 생성하였다. 편의보정은 현재 기후의 공간패턴이 미래에는 변화가 없다고 가정하고, GCM에서 제공하는 각 기상인자별 Historical (1990s, 1976~2005년) 자료와 동 기간에 관측된 자료와의 평균과 표준편차의 차이를 이용하여 미래자료를 구축하는 방법이다 (Ho et al., 2012).

본 연구에서는 중부지방의 이천측후소에 대해서 CanESM2를 바탕으로 미래 90년 기간을 2011~2040년 (2025s), 2041~2070년 (2055s), 2071~2100년 (2085s)으로 구분하여 미래 기상자료를 생성하였으며, 현재를 나타내는 1990s (현재기간)는 실제 이천측후소에서 제공하는 과거 기상자료를 활용하였고 1976~2005년을 기준으로 하였다.

3.2.4 앙상블 멤버

기상을 예보 또는 예측을 하기 위해서 기후시스템을 모델링하는 수치 모델을 사용한다. 기후시스템에서는 비선형 과정들이 존재하기 때문에 변화들에 대한 결정적인 예측에는 초기 조건이나 매개변수 사용의 민감도에 따른 불확실성이 따른다. 초기조건과 불확실성이 존재하는 상황에서 조금 더 정확한 예보 및 예측을 하기 위해서는 일반적으로 초기조건, 물리과정, 경계조건 등이 다른 여러 개의 모델을 반복적으로 수행하는 것이 필요하다. 이를 앙상블 예측이라 하며, 앙상블 예측에서 각각의 예보장들을 앙상블 멤버 (Ensemble member)라고 한다. Fig. 3.5는 앙상블 예측의 개념도를 나타낸 그림이다. 먼저, 수치모델의 초기장이 생산되면, 이를 내삽하여 앙상블 초기장을 생산한다. 섭동 (perturbation) 과정을 통해 섭동 초기장을 생산하며, 내삽된 초기장에 아무런 섭동을 추가하지 않고 모델을 수행하면 control 멤버가 되고 초기장에 섭동과정의 방법을 추가하여 모델을 수행하면 섭동멤버가 된다. 이때, 섭동은 모델과 관측과의 오차를 반영하여 모델 분석장 또는 정상적인 물리과정의 변화를 계산한 후에 그 위에 추가로 부가하는 작은 값들을 의미하며, 초기섭동 생성에는 Singular Vector, Breeding Method, Ensemble Transformation Kalman Filter 방법 등이 사용되고 있다. 이렇게 앙상블 멤버들이 생산되어 예측을 시작하는데 일정한 시간간격을 가지고 물리과정이 추가되어 시작 지점의 위치부터 최종 예측 결과까지 차이가 난다. 따라서 예측시간이 길어질수록 최종목표의 예측 편차가 커지게 되는데 이렇게 시작 시점보다 예측값의 범위가 퍼져 분포하는 것을 스프레드(spread)라 부른다. 즉 스프레드는 앙상블 평균에 대한 각 멤버의 표준편차를 의미하므로 불확실성(uncertainty)을 나타낸다고 할 수 있다. 앙상블 멤버를 통한 예측은 가장 가능성 있는 하나의 예측이 아니라 앙상블이 표현해 내는 범위에서 가능한 모든 예측 시나리오를 제공하므로, 예측기간 동안에 재해기상을 유발할 수 있는 기상현상의 발생 가능성과 어느 정도의 강도를 가지는 재해기상의 발생이 가능한지에 대

한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 평균에 대한 미래 기상자료를 활용하는 것도 중요하지만, 스프레드의 범위 즉 불확실성을 고려하기 위해서는 앙상블 멤버를 활용하여 미래의 기상 가능성을 검토하는 것도 중요하다 (기상청, 2012).

본 연구에서는 CanESM2 GCM의 모든 앙상블 멤버를 활용하여 극한 기상까지 모의할 수 있도록 설정하였다. CanESM2의 총 앙상블 멤버 개수는 5개이며, Table 3.2에는 IPCC에서 제공하는 GCM의 앙상블 개수를 나타내고 색이 짙을수록 개수가 많음을 뜻한다.

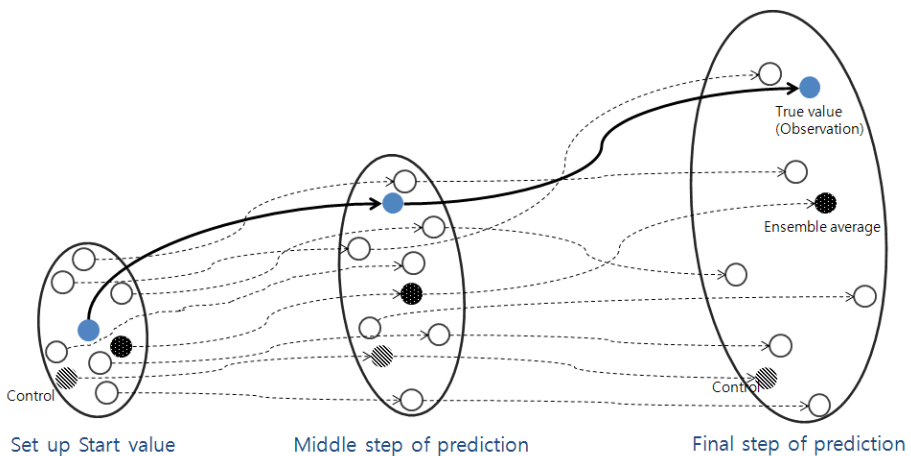


Fig. 3.5 Schematic illustration of concepts in ensemble prediction
(Wilks, 1995)

3.3 저수지 물수지 분석

본 연구에서는 저수지 물수지 해석을 위해 김현영 (1988)이 개발한 DIROM (Daily Irrigation Reservoir Operation Model)을 이용하였다. DIROM 모형은 저수지의 일별 물수지를 계산하고 관개량을 추정하기 위하여 개발된 모형으로, 저수지 유입·방류량을 주어진 시간 단위별로 저수량 또는 저수지 수위를 추적하기 위해 사용되며 그 요소들의 관계는 연속방정식으로 표현할 수 있다.

3.3.1 저수지 유입량 산정

유역에 대한 강우-유출 현상을 모의발생을 위해서는 여러 가지 수문 모형이 있지만 우리나라에서 많이 이용되고 있는 장기유출량 추정모형으로는 Tank 모형이 있다. 탱크 (Tank) 모형은 Suwagara에 의하여 단일 탱크의 선형시스템 (linear system)모형의 개념에서 출발된 것으로 탱크를 직렬 또는 병렬로 연결하여 유역의 지표유출, 중간유출, 기저유출을 각 성분별로 재현할 수 있도록 개념화한 것이다. 우리나라에서는 관개용 저수지의 일별유입량 모의발생 (김현영 등, 1988) 연구에서 소유역에 적합하도록 3단 직렬 탱크모형을 사용한 바 있는데, 실측 유출량 자료로 모형을 보정해야만 사용할 수 있는 매개변수를 유역면적, 토지 이용별 면적 등에 의한 회귀식을 유도하여 미계측 유역에서 사용할 수 있도록 함으로써 미계측 유역에서 사용할 수 없는 기존 탱크모형의 단점을 보완한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 미래 저수지 유입량 산정을 위해 소유역이며 매개변수의 수를 줄일 수 있는 3단 탱크모형이 적합할 것으로 판단하였다. Table 3.3은 환경부에서 제공하는 2007년 토지피복도를 이용하여 대상저수지 유역의 논, 밭, 산림 비율을 나타낸 것이다.

Table 3.3 Land cover area of the study watershed

Reservoir name	Watershed area	Paddy	Upland	Forest
	(ha)	(%)	(%)	(%)
Sulsung	616	24.8	44.2	15.0
Docheok	980	5.4	4.7	81.9
Janggun	2,066	9.5	11.5	71.4
Mojeom	857	7.9	6.1	82.8

TANK모형에 의한 유역의 유출량은 일별 강수량으로 부터 다음 식에 의하여 계산된다.

$$Q_t = \sum_{t=1}^n \sum_{h=1}^m (ST_{i,t} - H_{ij}) A_{ij} \quad (1)$$

여기서, Q_t 는 t 일의 총유출량 (mm), i 는 TANK의 수, j 는 i TANK의 유출공의 수, $ST_{i,t}$ 는 t 일의 i 번째 TANK의 저류수심 (mm), H_{ij} 는 i TANK의 유출공의 높이 (mm) 및 A_{ij} 는 유출공의 단면적 (무차원)이다.

또한 저류수심 ST 는 단위시간 t 에 따라 다음 식과 같이 계산된다.

$$ST_{i,t} = ST_{i,t-1} + R_t - E_t - I_{i,t} - Q_{i,t-1} \quad (2)$$

여기서, $ST_{i,t-1}$ 는 $t-1$ 일의 i 번째 TANK의 수심 (mm), R_t 는 t 일의 강수량 (mm), E_t 는 증발량 (mm) 및 $Q_{i,t-1}$ 는 i 번째 TANK의 $t-1$ 일의 유출량이다.

한편 침투량 $I_{i,t}$ 는 다음 식과 같이 계산한다.

$$I_{i,t} = ST_{i,t} \times B_i \quad (3)$$

여기서, B_i = i 번째 TANK의 침투공의 단면적 (무차원)이다.

3.3.2 논벼 수요량 산정

논벼 수요량을 발생시키는 주요 인자를 살펴보면 벼의 증발산량과 침투량 및 유효우량 등으로 구분할 수 있다. 여기서 침투량은 재배토양의 토성, 지하수위 등의 영향을 받으며 증발산량은 작물의 종류, 기상여건 등에 따라 변화하고 유효우량은 강수량에 따라 결정된다. 또한 논벼 수요량은 재배관리 용수량과 시설관리 용수량 등의 손실수량을 고려해야 한다. 논에서 필요한 수요량 산정과정을 요약하면 Fig. 3.6과 같이 나타낼 수 있다. 기상자료를 이용하여 산정한 증발산량과 침투량을 더하여 감수심을 계산하고, 영농방식에 따라 달라지는 재배관리용수량을 합하여 순용수량을 산정한다. 조용수량은 순용수량에 송수손실, 배분관리손실 및 시설유지용수량을 더하여 계산한다. 이때, 영농방식은 이앙재배와 직파재배로 구분할 수 있으며 본 연구에서는 이앙재배를 기준으로 하였다.

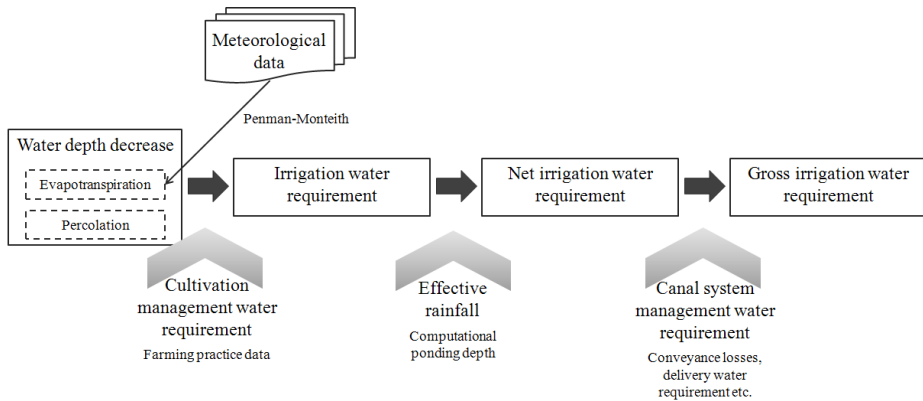


Fig. 3.6 Concept of estimation of paddy rice water demand

가. 증발산량

벼의 증발산량은 답 표면의 수면증발량과 벼의 엽면증발량의 합으로 구성되며 작물의 종류, 작부시기, 기상 등 여러 요인에 의해 많은 변화가 발생한다. 실제의 증발산량은 여러 요인에 의해 정량화하기 어려우며 일반적으로 기준작물증발산량을 산정한 후 실제 작물의 증발산량과의 차이를 분석하여 이를 작물계수로 조정하는 방법을 적용하고 있다.

본 연구에서는 국제식량농업기구 (FAO)에서 통일하여 사용하기로 결정하고, 세계관개배수위원회 (ICID) 및 세계기상기구 (WMO) 등에서 추천하고 하고 있는 Penman-Monteith 공식을 이용하여 기준작물 증발산량을 산정하였으며, 다음식과 같다.

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (4)$$

여기서, PET 는 기준작물증발산량 (mm/day), Δ 는 증기압 곡선의 기울기 (kPa/°C), R_n 은 순일사량 (MJ/m²day), G 는 토양 열 유속 밀도 (MJ/m²day), γ 는 건습계 상수 (kPa/°C), T 는 2m 높이에서 일평균기온 (°C), u_2 는 2m 높이에서 풍속 (m/s), e_s 는 포화증기압 (kPa), e_a 는 실제 증기압 (kpa)이다.

기준작물증발산량을 토대로 논벼의 시기별 작물계수를 적용하여 논벼의 작물증발산량을 산정하였으며, 순별 작물계수는 Table 3.4와 같다.

Table 3.4 10-day crop coefficient (Yoo et al., 2006)

	Apr			May			Jun			Jul			Aug			Sep		
	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L	F	M	L
Kc	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.97	1.07	1.16	1.28	1.45	1.50	1.58	1.46	1.45	1.25	1.01

F: the first part of a month

M: the middle part of a month

L: the last part of a month

나. 침투량

논에서의 침투량 (Deep Percolation)은 벼의 뿌리 아래 하층 토양으로 강하하는 물의 양이다. 이 양은 최종적으로 지하수로 남거나 일부는 회귀수로 다시 이용되기도 한다. 침투량은 재배방식과 물관리 방법에 따라 크게 변하는 포장의 수리조건 및 토양조건에 따라 달라진다 (정하우 등, 2007). 본 연구에서는 한국농어촌공사(구, 농업기반공사)에서 농업용수개발사업시 측정한 침투량 (1970~1998)을 조사하였고 Table 3.5는 활용한 값을 나타낸다.

Table 3.5 Deep percolation of irrigation districts for this study (Lee, 2000)

Reservoir name	Percolation
	(mm)
Sulsung	4
Docheok	7
Janggun	5
Mojeom	6.8

다. 유효우량

작물 생육기간 중 논에 내리는 강우는 그 양에 따라 일부 또는 전부가 남아 작물 생육에 이용되는데, 이 강우를 유효우량 (Effective rainfall)이라 한다. 유효우량은 강우량, 강우강도, 토성, 토양의 함수량 등에 영향을 받으며, 담수재배인 논에서는 최대물꼬높이, 생육시기별 물관리 방법 등이 유효우량을 결정하는 가장 중요한 변수이다. 유효우량을 산정하는 방법은 여러 식이 제안되고 있으나 일 강우량과 물관리 방법 등을 종합적으로 고려할 수 있는 일별 담수심 추적법을 선택하였으며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 논에서 담수심의 변화는 당일의 강우량과 필요수량 및 담수심의 관계에서 구해야 하며 이는 가정한 물꼬높이인 최대 담수심과 상시관리 담수심인 최소 담수심에 의해 제한된

다. 본 연구에서는 최대·최소 담수심을 80 mm, 20 mm로 적용하였다.

$$Re(t) = D(t) - D(t-1) - Req(t) + U(t) \quad (5)$$

여기서, $U(t)$ 는 $ET+I$ 로 당일의 필요수량 (mm/day)이고, ET 는 작물증발산량 (mm/day), I 는 당일의 침투량 (mm/day)이다.

일강우량의 크기가 5.0 mm 이하인 경우에는 빗앞에 차단되어 실제 논에는 기여하지 않는 무효강우로 보는 것이 타당하며 어떠한 경우에도 유효우량의 크기는 최대 담수심에 그날의 소비수량을 더한 양을 초과하지 못한다 (정하우, 2007).

라. 재배관리 용수량

이앙재배는 작물의 생장에 따른 시기별로 용수수량이 다르며 묘대기, 이앙기, 본답기 등이 있다. 묘대기는 못자리에서 묘를 키우는 과정이며 이앙기는 못자리에서 본답으로 옮겨 심는 과정이고 이때 이앙일수는 벼의 재배체계, 씨레질 또는 이앙을 위한 작업의 능률 등에 따라 정하며 일반적으로 15~20일 정도이다 (농림부, 1998). 본 연구에서는 적용한 작부 시기는 Fig. 3.7과 같다.

묘대정지기 (Preparation)는 침투량과 못자리 정지용수가 필요하며, 순수묘대기 (Seedling age)는 묘가 자라는 기간이므로 침투량과 증발산량을 필요로 한다. 묘대·이앙기 (Raising seedlings & transplanting)는 지역에 따라 이앙이 시작되고 묘대기가 끝나지 않아 중첩되는 시기이며, 이앙·본답기 (Transplanting & growing rice in paddy field)는 일부에서는 아직도 이앙이 계속되고 있으며 이앙이 완료된 지역에서는 본답용수를 공급해 주어야 할 경우를 나타낸다. 못자리 용수는 못자리 정수기간을 4일로 잡아 정지용수를 140 mm로 설정하였으며, 이앙 전의 논갈이에 필요한 용수와 씨레질 작업을 용이하게 하는 용수량인 이앙용수량도 140 mm 기준으로 하였다.

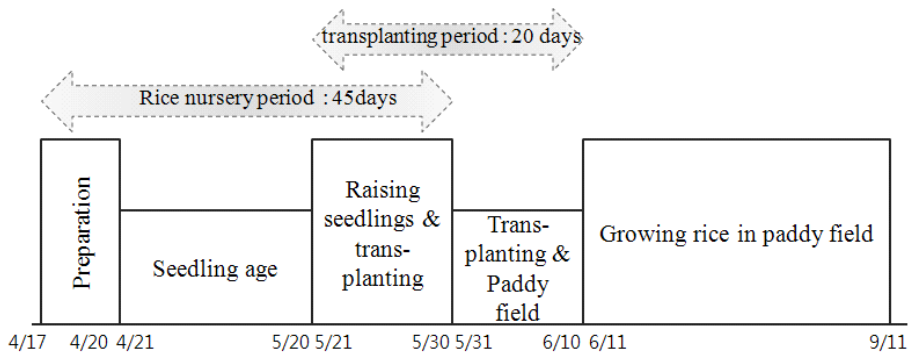


Fig. 3.7 Growth stages of rice at paddy fields (Ministry of Agriculture and Forestry, 1998)

마. 시설관리용수량

시설관리용수량은 송수손실수량, 배분관리용수량 및 시설유지용수량으로 구분된다. 여기서 송수손실수량은 포장의 입지조건, 수로의 길이 및 형식 등을 고려하고 배분관리용수량은 수로형식, 관리조직, 관리체계, 시설장치화의 정도, 논의 분산정도 등과 함께 시설정비수준과 관리수준 등을 고려하여야 한다. 또한 시설유지용수량은 비관개기에 수로의 기능을 유지·보전하기 위한 수량이다 (정하우 등, 2007). 본 연구에서 논의 송수손실은 전국 농지개량조합 (농조)별 용수로의 현황자료를 이용하였으며, Table 3.6과 같다.

Table 3.6 Conveyance losses of irrigation districts for this study (Lee, 2000)

Reservoir name	Conveyance losses
	(mm)
Sulsung	14
Docheok	13
Janggun	14
Mojeom	14

3.3.3 저수지 물수지 분석

저수지에서의 물수지를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t + P_t + U_t - (R_t + O_t + E_t + G_t + D_t) \quad (6)$$

여기서, S 는 저수량 (Storage), I 는 유입량 (Inflow), P 는 수면강수량 (Precipitation), U 는 지하수유입량 (Underground inflow), R 는 방류량 (Release), O 는 여수로월류량 (Overflow), E 는 수면증발량 (Evaporation), G 는 지중침투량 (Percolation), D 는 제방침투량 (Dam seepage) 및 t 는 일 (day)이다.

저수지 유입량은 유역에서의 유출량을 의미하며 Tank 모형을 이용하여 산정하였으며, 방류량은 일별 필요수량을 만족할 수 있도록 관개를 위해 사용한 수량에 수로를 통하여 운송하기 위한 시설관리용수량을 더한 조용수량으로 산정하였다. 월류량은 저수지 유입량으로부터 수위가 만수위시 자연 월류하는 양으로 산정하였다. 지하수유입량, 지중침투량 및 제방침투량은 실측이 거의 불가능한 요소들이다. 특히 지하수 유입은 수문 관측지점에서 지표수로 측정되거나 그 변화가 월단위 이상이기 때문에 일단위와 같이 매우 단기간의 물 수지에 있어서는 고려의 대상이 되지 않는다. 또한 지중침투량은 댐 계획시부터 누수를 방지할 목적으로 지수벽을 설치하므로 이로 인토 누수량은 매우 적거나 무시할 수 있다. 따라서 이러한 양은 매우 적거나 단기간의 물 수지에 영향을 미치지 않는다고 (김현영 등, 1986). 따라서 본 저수지의 물수지 분석에서는 지하수유입량, 지중침투량, 제방침투량 및 수면증발량은 무시한다. 이에 의해 식 (6)을 다시 쓰면, 식(7)와 같다.

$$S_t = S_{t-1} + I_t + P_t - (R_t + O_t) \quad (7)$$

3.4 저수지 가뭄대응능력 평가 방법 선정

3.4.1 절단수준법

절단수준법 (Threshold level method)의 원래 명칭은 method of crossing theory 이며, truncation level method라고도 한다. 일반적으로 주어진 절단수준보다 높고 낮은 상황에 대한 연구를 위해 사용한다. 특히, 이 방법은 수문학적인 측면에서의 수요와 공급 분석에 적절하여 수문학적 설계, 저수지 저장 시스템, 수자원 관리, 물 공급시스템, 농업관개수 관리 등에서 주로 사용되었다 (Tallaksen and van Lanen, 2004).

Fig. 3.8은 절단수준법을 이용하여 저수지 수위에 대해 시계열이 특정한 수준 이상 또는 이하로 나뉘는 것을 보여준다. 절단수준 (X_0)을 정함으로써 가뭄 또는 물부족을 표현하는 특성인 지속기간 (Duration; D), 심도 (Severity; S), 그리고 강도 (Magnitude; M)를 구할 수 있다. 절단수준을 기준으로 밑에 있는 수위를 용수공급 부족량이라고 한다면, 저수지의 용수공급 부족량의 3개 변수인 지속기간, 심도, 그리고 강도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = M \cdot D \quad (8)$$

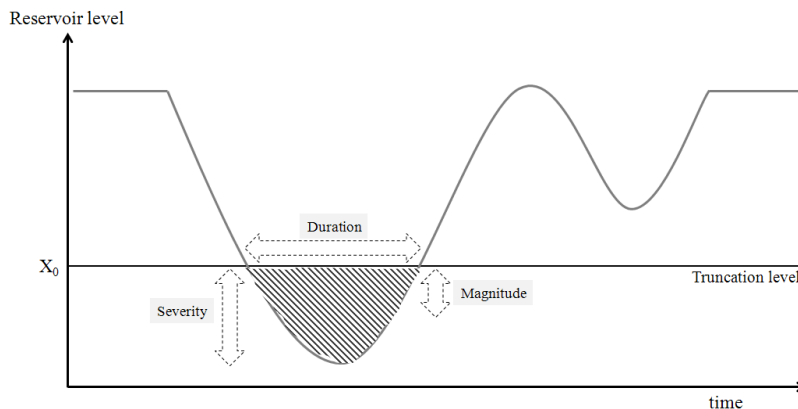


Fig. 3.8 Fundamental parameters of runs of a series

가. 절단수준의 설정

절단수준은 저수지의 수위 변동 및 용수공급 부족량 유형에 따라 그 기준은 설정할 수 있다. 저수량 분석을 수행하기 위해서 국내에서는 주로 강수량에 해당되는 355위 유량 (Q355)의 10년 평균값 (평균 갈수량) 또는 10년 빈도분석 값 (기준 갈수량)을 산정하여 사용하고 있으며, 미국 및 영국 등의 국가에서는 7일 지속기간 10년빈도 유량을 주로 사용하고 있다 (이길성 등, 2009). 해외에서는 저수량 분석보다 하천을 대상으로 물 부족에 대한 연구가 많으며, 항상 물이 흐르는 하천의 경우 기준이 유황곡선의 70%, 90%가 될 수 있고, 간헐천의 경우 유황곡선의 70%가 0이 될 수 있다 (Meigh et al., 2002; Hisdal et al., 2004). 따라서 시기별로 변화하는 저수량에 대하여 절단수준의 설정은 매우 중요하다. 즉, 특정 지역이 가뭄이 장기간 지속되어 저수지의 수위가 낮을 경우가 많이 발생하는 경우에는 절단수준을 낮게 잡아야 할 것이며, 반대의 경우에는 절단수준을 높게 잡아야 할 것이고, 이 절단수준은 고정되거나 시간에 따라 변할 수 있다.

본 연구에서는 저수지의 가뭄대응능력을 평가하기 위하여 비관개기와 관개기에 따라 수위가 변화함을 고려하고, 저수지의 극한상황과 저수지 축조 당시 가뭄에 대응할 수 있는 상황이 미래에 어떤 변화가 있는지를 판단하기 위해서 절단수준을 사수위와 10년빈도 수위로 선정하였다. 또한, 사수위는 절단수준이 고정되어 있는 것이고, 10년빈도 수위는 시기별로 변화하기 때문에 시기별로 저수량이 많을 때와 적을 때의 편차를 고려할 수 있을 것이라 판단된다.

나. 지속기간과 심도의 산정

용수공급으로 부족으로 생긴 가뭄은 다른 재해와 달리 발생시점이 명확하지 않으며, 심도에 따라 피해 규모와 정도가 광범위하다는 특징을 가지고 있어 가뭄대응능력을 평가하기 위해서는 심도를 분석하는 것이 중요하다. 심도를 분석하기 위해서는 가뭄사상의 시작과 끝, 즉 용수공급의 실패의 여부를 설정해야 한다. 본 연구에서는 사수위를 기준으로 했을 때 현재 수위가 사수위와 같아지는 때를 시작으로, 수위가 사수위보다 위로 올라가는 부분을 끝으로 정의하였다. 또한, 10년빈도 수위의 경우는 10년빈도 수위를 절단수준으로 하여 밑으로 내려가는 부분을 시작으로 하였고, 현재수위가 절단수준 위로 올라가는 부분을 끝으로 설정하였다. 일단, 절단수준에 해당하는 수위가 주어진다면 용수공급 실패의 지속기간 또는 가뭄의 지속기간, 용수공급 실패의 심도, 용수공급 실패에 따른 용수공급 부족량, 그리고 용수공급 실패가 다시 발생하는데 걸리는 시간 등을 구할 수 있다.

미래 기상자료를 활용하여 농업용 저수지의 수위를 모의하고 사수위와 10년빈도 저수위를 절단수준으로 산정하여, 그 절단수준과 같거나 그보다 아래로 내려가는 여부에 따라 용수공급 실패로 정의하고 대응능력을 검토하고자 하였다. 이 때 지속기간은 용수공급 실패의 기간을 나타내며, 이 기간이 길어질 경우 관개지구의 가뭄이 장기화될 가능성이 높아진다. 따라서 지속기간은 심도의 개념과 유사하다고 할 수 있다. 심도는 용수공급 실패가 얼마나 심각한 것이지를 나타내는 지표이기 때문에 본 연구에서는 지속기간과 심도를 같은 의미로 간주하였다. 용수공급 부족량 및 용수공급 실패가 다시 발생하는데 걸리는 기간 등을 산정하여 제시할 수 있으나, 먼저 기후변화에 따른 미래의 심도 변화를 분석하고자 기후 시나리오에 따른 심도 변화 및 시기별 심도 변화를 중심으로 수행하였다.

3.4.2 빈도분석

기후변화로 인하여 현재와 다른 기상패턴으로 관개 지구에 용수공급 실패에 따른 가뭄을 야기하는 수리시설물인 농업용 저수지를 대상으로 가뭄대응능력을 평가하기 위하여 절단수준을 사수위와 10년빈도 저수위로 선정하였다. 사수위는 저수지 축조 시 계획되어 제시되는 값이지만, 10년빈도 저수위는 빈도분석을 통하여 선정해야한다.

우리나라에서는 농업용수 수요량 산정 시 관개계획기준치 (설계빈도)는 지구의 가뭄피해자료에 따라 결정하지만 보통 10년빈도 한발 (10년에 한번 일어날 정도의 한발)을 극복할 수 있도록 결정한다. 설계 기준에 의하면 관개계획기준치를 구하는 방법에는 크게 10년빈도에 해당하는 계획기준년을 선정하여 구하는 방법과 전체 관측 자료로 10년빈도에 해당되는 값을 확률 계산하는 방법 두 가지로 나눌 수 있다 (농림부, 1998).

본 연구에서는 계획기준년을 선정하고 계획기준년의 저수위를 10년빈도 저수위로 설정하였다. 계획기준년을 선정하는 방법에는 기상자료인 강수량을 이용하거나 연최대 필요저수량을 산정하여 빈도 분석하는 경우가 있는데, 저수지의 주 목적은 관개지구에 필요한 용수를 공급하는 것이기 때문에 강수량보다는 연최대 필요저수량을 기준으로 빈도분석하는 것이 더 적합하다고 판단되어 활용하였다. 연최대 필요저수량은 농업용수를 공급하면서 저수지가 필요로 하는 저수량 중 연최대값을 의미하며, 저수지 물수지 분석의 결과로 산출된 일별 저수량 결과로부터 연최대 필요저수량을 산정하고 빈도분석을 수행하였다. 빈도분석에는 최적확률분포형을 선정하여 빈도계수법을 활용하는 연구가 많이 있지만, 확률분포를 정확하게 구하기 위해서는 많은 자료가 필요하기 때문에 30개의 자료를 활용할 경우에는 불확실성이 커진다. 따라서 30개의 연최대 필요저수량 중 3번째로 큰 값을 가지는 연도를 10년빈도에 해당하는 계획기준년으로 설정하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 미래 기상자료 특성

RCP4.5 및 8.5 기후시나리오를 적용한 5개의 앙상블 멤버를 기반으로 편의보정 기법을 적용하고 1990s (1976~2005년), 2025s (2011~2040년), 2055s (2041~2070년), 2085s (2071~2100년)로 구분하여 미래 기상자료를 구축하였으며 기온, 강수량 및 강수량 패턴 변화를 분석하였다.

4.1.1 기온 변화 분석

본 연구에서 사용한 RCP 시나리오 경우 일 최고, 최저 기온 및 평균 기온이 제공되기 때문에 이를 구분하여 모의하였으며, Table 4.1은 5개의 앙상블 시나리오에 대한 30년 연평균기온 변화를 나타낸 것이다. 일 최고기온은 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우인 RCP4.5에 대하여 현재대비 (1976~2005년) 2025s에서는 1.2~1.9 °C, 2055s에서는 2.5~2.7 °C, 2085s에서는 3.1~3.2 °C 증가를 보였으며, 현재 추세 (저감 없이)로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5에서는 현재대비 2025s에서 1.5~1.8 °C, 2055s에서 3.3~3.7 °C, 2085s에서 5.3~5.9 °C 증가를 나타내었다. 일 최저기온의 증감을 살펴보면 RCP4.5의 각 시기별로 1.0~1.7 °C, 2.3~2.5 °C, 2.8~3.0 °C 증가하는 것으로 나타났으며, RCP8.5에서는 각 시기별로 1.5~1.6 °C, 3.1~3.5 °C, 4.9~5.4 °C 증가를 보였다. 즉, 기온의 경우 미래 시점으로 갈수록 지속적으로 증가 추세를 보이고 있으며, 특히 RCP8.5에서 증가가 큼을 보여주고 있다. 이 증가값은 IPCC 5차 보고서에서 제시한 전지구적 평균기온인 3.7 [2.6~4.8 °C] 보다 상승폭이 클 것으로 예상되기 때문에 작물의 고온피해 및 작부시기 변화에 대한 대책이 필요할 것으로 전망된다.

각 앙상블 시나리오별 증가를 살펴보면, 미래시기에서 가장 큰 증가는 앙상블 2번에서 RCP4.5 시나리오의 일 최고기온이었으며, 가장 작

은 증가는 RCP8.5 시나리오의 미래시기에서에서 4번으로 나타났다.

각 RCP에 따른 양상블 시나리오별 일 평균기온의 30년 평균 월별 증감을 Fig. 4.1에 나타내었다. 현재시기와 비교하였을 때 2025s에서는 RCP 시나리오와 양상블 시나리오에 따른 차이 없이 전체적으로 약 0.6 °C (3월) ~ 2.3 °C (7월) 증가하는 것으로 나타났으며, 2055s에서도 7월 (4.2 °C)에 큰 증가가 예상됨에 따라 벼 수량을 좌우하는 중요한 시기만큼 적절한 물관리를 통한 고온장애 예방이 필요할 것으로 사료된다. 2085s에서는 RCP4.5의 경우 약 1.6 °C (3월) ~ 4.4 °C (7월), RCP8.5는 3.1 °C (3월) ~ 7.7 °C (8월) 증가하는 것으로 나타나 현재대비 RCP별 증가 차이가 분명하게 드러남을 보여주고 있다. 특히, 2085s 시기에는 RCP8.5의 7월과 8월은 양상블 시나리오별로도 차이를 나타내고 있어, 다른 시기보다 예측하는데 있어 불확실성을 가지는 것으로 판단된다.

Table 4.1 Comparison of 1990s (1976~2005) and RCP scenarios for annual mean temperature

(Unit: °C)

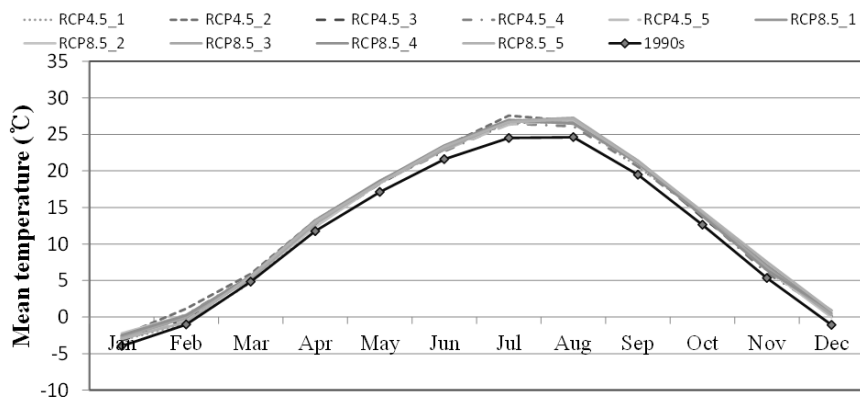
	1990s	E ^d	RCP4.5			RCP8.5		
			2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Max. ^a	17.5	1	18.7	20.0	20.6	19.2	21.0	23.0
Mean ^b	11.4		12.5	13.7	14.3	12.9	14.6	16.5
Min. ^c	6.1		7.1	8.3	9.0	7.6	9.3	11.2
Max. ^a		2	19.4	20.2	20.7	19.0	21.2	23.3
Mean ^b			13.1	13.9	14.3	12.9	14.8	16.7
Min. ^c			7.8	8.6	9.0	7.6	9.6	11.5
Max. ^a		3	18.9	20.1	20.7	19.0	20.8	23.3
Mean ^b			12.6	13.8	14.4	12.9	14.6	16.8
Min. ^c			7.3	8.5	9.0	7.6	9.3	11.4
Max. ^a		4	18.9	20.1	20.6	19.2	20.8	22.8
Mean ^b			12.6	13.7	14.2	12.9	14.5	16.3
Min. ^c			7.3	8.4	8.9	7.6	9.2	11.0
Max. ^a		5	19.0	20.2	20.6	19.2	21.1	23.4
Mean ^b			12.8	13.8	14.2	13.0	14.6	16.7
Min. ^c			7.5	8.5	8.9	7.7	9.3	11.5

^aMax.: daily maximum temperature

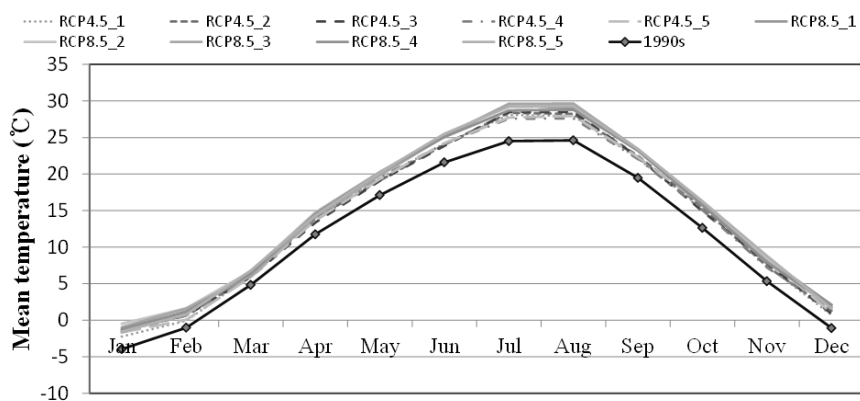
^bMean: daily mean temperature

^cMin.: daily minimum temperature

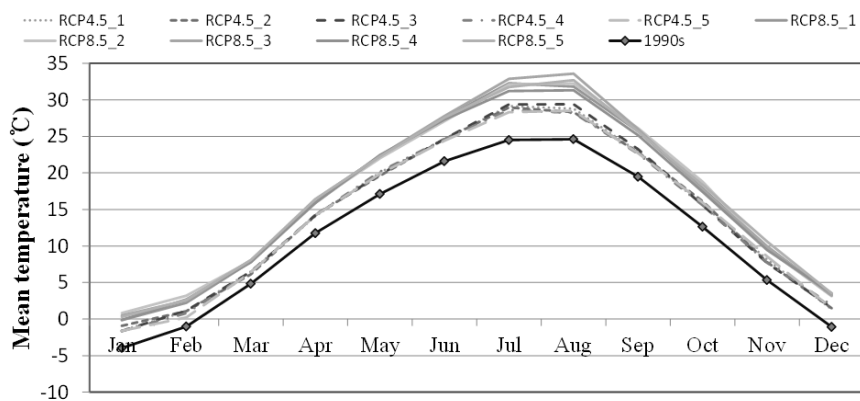
^dE: Ensemble member



(a) 2025s



(b) 2055s



(c) 2085s

Fig. 4.1 Comparison of monthly mean temperature

4.1.2 강수량 및 강수패턴 변화 분석

가. 강수량

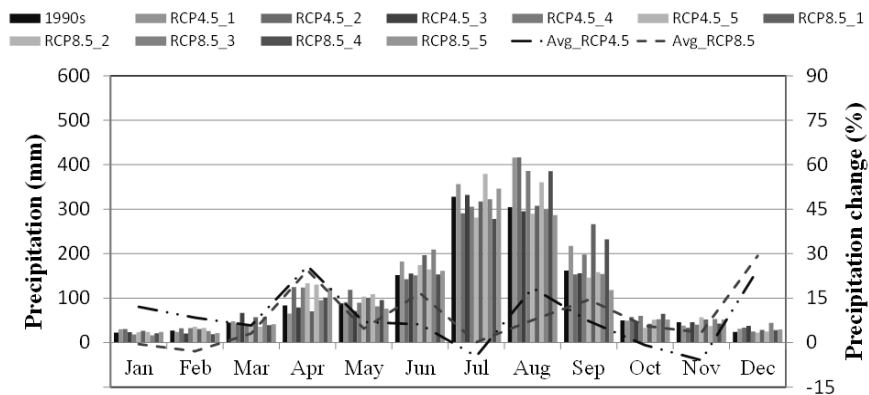
Table 4.2는 모의된 일별 강수량을 바탕으로 시나리오에 따른 시기별 30년 평균 연강수량을 나타낸 것이다. 현재 (1990s)는 평균 연강수량이 1,335.5 mm이지만, RCP4.5 시나리오에 따른 미래 연강수량은 현재대비 시기별로 7.5 %, 17.1 %, 15.4 % 증가하는 것으로 나타났으며 특히 2055s가 2085s 보다 다소 크게 증가하는 것으로 전망되었다. RCP8.5에서도 시기별로 8.2 %, 19.9 %, 32.5 % 증가하는 것으로 분석되었으며, 모든 시기에서 RCP4.5보다 크게 증가하는 것으로 예상되었다. 반면 양상블 시나리오 중 3번의 RCP4.5 (2025s)에서 현재보다 강수량이 감소하는 것으로 나타났고 전반적으로 양상블 멤버 중 가장 작게 증가하는 양상블이었으며, 5번의 RCP8.5 (2085s)에서는 현재보다 약 50% 증가하는 것으로 나타나 양상블 시나리오별 중 가장 크게 증가하며 불확실성도 큰 것으로 파악되었다.

이수부분에 있어 강수량은 연강수량의 변화도 중요하지만, 저수지는 관개시기와 비관개시기에 따라 운영이 달라지기 때문에 관개시기에 적절한 강수량이 확보되는 것이 중요하다. 따라서 월별 강수량의 변화를 파악하는 것이 필요하며 Fig. 4.2는 30년 평균 월별 강수량을 나타낸 것이다. 가까운 미래인 2025s에서는 이앙시기 용수공급에 직접적인 영향을 주는 3~6월에 RCP 4.5 및 RCP 8.5에 관계없이 현재보다 강수량이 증가하는 경향을 나타냈으며, 반면에 그 다음의 용수공급을 위해 저수를 해야 하는 비관개시기인 10월, 11월 (RCP4.5) 및 1월, 2월 (RCP8.5)에서는 현재보다 감소하는 경향을 나타내었다. 2055s 및 2085s에서는 10월과 11월의 경우를 제외하고 현재대비 증가하는 것으로 분석되었고, 특히 8월과 9월의 증가가 크게 나타났으며 이는 미래시기로 갈수록 홍수기 강수량의 증가가 연평균 강수량의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 양상블 시나리오별 증감을 살펴보면 1번의 경우 RCP4.5 및 8.5의 미래시기에서 모두 가장 큰 증가를 보였으며 특히 RCP8.5의

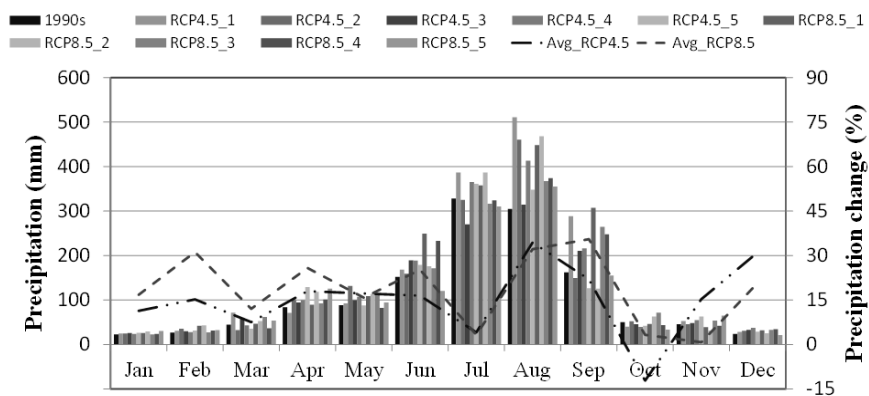
2085s에서는 8월에 현재대비 90% 증가하는 것으로 나타났다. 반면에 5번 앙상블 시나리오 경우는 전체적으로 작은 증가 또는 감소를 보였으며, RCP4.5의 미래 세시기의 3월에 현재대비 -12.2%, -20.6%, -2.6% 감소하는 것으로 전망되었다. 즉, 강수량 변화 경향성은 기온 변화와 달리 미래로 갈수록 지속적으로 증가하는 경향을 나타내지 않았으며 주목해야하는 점은 연평균 강수량의 증가는 홍수기인 7~8월 강수량의 증가가 큰 영향을 주었고 앙상블 시나리오별로 관개시기의 직접적인 영향을 주는 3월 강수량 편차가 큼에 따라 홍수 및 가뭄에 대한 취약도가 증가할 수 있음을 보여주고 있다.

Table 4.2 Comparison of 1990s (1976~2005) and RCP scenarios for annual precipitation

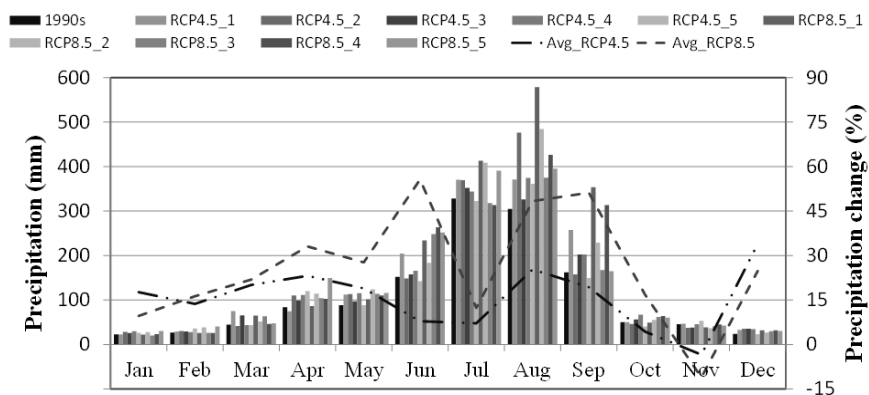
1990s	Ensemble	(Unit: mm, %)					
		RCP4.5			RCP8.5		
		2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
1,333.5	1	1,550.7 (16.3)	1,766.1 (32.4)	1,647.7 (23.6)	1,495.9 (12.2)	1,791.8 (34.4)	1,999.1 (49.9)
	2	1,477.5 (10.8)	1,546.9 (16.0)	1,594.9 (19.6)	1,510.6 (13.3)	1,632.5 (22.4)	1,780.4 (33.5)
	3	1,329.8 (-0.3)	1,419.4 (6.4)	1,483.8 (11.3)	1,412.0 (5.9)	1,596.2 (19.7)	1,569.5 (17.7)
	4	1,471.7 (10.4)	1,615.6 (21.2)	1,562.4 (17.2)	1,462.0 (9.6)	1,574.1 (18.0)	1,765.8 (32.4)
	5	1,340.1 (0.5)	1,458.9 (9.4)	1,406.6 (5.5)	1,333.2 (0.0)	1,397.5 (4.8)	1,720.2 (29.0)
	Avg.	1,434.0 (7.5)	1,561.4 (17.1)	1,539.1 (15.4)	1,442.7 (8.2)	1,598.4 (19.9)	1,767.0 (32.5)



(a) 2025s



(b) 2055s



(c) 2085s

Fig. 4.2 Comparison of monthly precipitation and change in precipitation comparing to 1990s data

나. 강수일

모의된 강수 자료를 각 시나리오에 따라 평균 강수일을 강수량에 따라 분석하였는데, 그 결과는 Table 4.3 과 같다. 기후변화가 진행됨에 따라 전체 강수일은 최소 3일 (RCP4.5, 2025s; RCP8.5, 2025s)부터 최대 11일 (RCP8.5, 2085s)까지 증가하는 것으로 나타났다. 1990s에서는 전체 강수일 중 5 mm 미만의 강수일 비율이 52 %였지만, RCP4.5/8.5 및 모든 앙상블 시나리오에서 5 mm 미만의 강수일 비율이 다소 감소하는 것으로 나타났다. 반면에 전체 강수일 중 5~50 mm 경우의 강수일 비율이 41 %이었는데 크게 증가하여 최대 50 %까지 비율이 증가할 것으로 예상되었다. 전체 강수일 중 80 mm 이상과 200 mm 이상의 강수일 비율은 평균적으로 크게 변하지 않는 것으로 분석되었으나, 앙상블 시나리오 별로 차이가 나타났다. 1번에서는 현재대비 미래기간에서 증가하는 것으로 예상되었으며, 5번에서는 현재와 비슷하거나 강수일이 감소할 것으로 나타났다. 즉, 전체 강수일에서 5 mm 이하의 강수일이 차지하는 비율은 감소하고, 5~50 mm 경우의 호우일수가 차지하는 비율은 증가할 것으로 예상되었다. 기후변화가 진행됨에 따라 강수량과 강수일 모두 증가하게 되는데, 80 mm 이상 및 200 mm 강수일수가 평균적으로 크게 증가하지 않는 것으로 나타나 강우강도가 크게 증가할 것으로 판단된다.

Table 4.3 The number of rain days for 1990s (1976~2005) and RCP scenarios

(Unit: days)								
P ¹⁾ (mm)	1990s	E ²⁾	RCP4.5			RCP8.5		
			2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Total	98	1	100	107	106	100	103	108
		2	100	105	109	102	110	110
		3	101	102	105	104	107	104
		4	102	105	106	97	105	113
		5	102	108	106	103	105	110
		Avg.	101	105	106	101	106	109
< 5	51	1	47	47	48	47	45	49
		2	44	46	49	44	49	47
		3	46	46	47	47	47	45
		4	46	46	46	43	46	49
		5	46	48	48	47	48	48
		Avg.	46	47	48	45	47	48
5≤ <50	40	1	47	53	50	48	50	51
		2	51	54	54	53	56	57
		3	50	51	54	53	55	54
		4	50	53	55	48	54	57
		5	53	55	54	52	52	55
		Avg.	50	53	53	51	53	55
50≤ <80	4	1	4	4	4	3	5	4
		2	3	4	3	4	4	4
		3	3	3	3	3	3	3
		4	4	4	4	3	3	4
		5	3	3	3	3	3	4
		Avg.	3	4	3	3	4	4
80≤	3	1	3	3	3	3	3	4
		2	2	2	3	2	2	3
		3	2	2	3	2	3	3
		4	2	3	2	3	2	3
		5	2	2	2	2	2	3
		Avg.	2	2	3	2	3	3
200≤	1	1	2	1	1	1	2	2
		2	1	1	2	1	1	2
		3	1	1	1	2	1	1
		4	1	1	1	1	1	1
		5	1	1	1	1	1	1
		Avg.	1	1	1	1	1	1

1) P: Precipitation

2) E: Ensemble

다. 무강우일수

농업용 저수지는 일반적으로 비관개기동안 강우를 담수한 후에 관개기에 농업용수를 공급하는 기능을 수행함으로써 기상학적인 가뭄과는 상이한 기작을 나타내지만, 이양기인 5~6월에 무강우일수가 길어질 경우 가뭄에 직접적인 영향을 주기 때문에 기상요소 중 하나인 무강우일수의 변화양상을 파악하는 것이 중요하다. 모의된 강수 자료를 바탕으로 각 시나리오에 따라 무강우사상의 발생빈도를 무강우일수에 따라 분석하였으며, 그 결과는 Table 4.4와 같다. 본 연구에서는 모의된 강수량이 일별 자료이기 때문에 무강우가 연일해서 발생하는 상황을 파악하여 그 기간에 따른 횟수의 변화양상을 나타내었다. 1990s의 무강우사상은 30년간 총 448번이었으며, 3~7일의 무강우일수가 지속되는 경우가 약 45 %로 가장 많았다. RCP4.5는 5개의 앙상블 시나리오에서 426~463번으로 비슷한 양상을 보였으나, 3~7일의 무강우일수는 40 %~47 %로 다소 감소하는 것으로 나타났고, 반면에 1~2일이 차지하는 비율이 32~39 %로 증가함이 예상되었다. RCP8.5에서 전체 무강우사상은 231~294번으로 현재대비 50~60 % 수준이며, 특히 1~2일 무강우가 발생하는 경우가 80 %를 넘는 것으로 나타나 연일 발생하는 강우사상이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 15일 이상 발생하는 무강우사상은 RCP8.5 시나리오에서 발생하지 않는 것으로 예상되어 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우인 RCP4.5와는 결과 차이를 보임에 따라 미래 수자원 관리와 안정적 용수공급에 있어 기후변화 정책과 불확실성을 저감하기 위한 앙상블 멤버와의 연계가 필요한 것으로 판단된다.

Table 4.4 The number of no-rain duration in March~June

(Unit: times)

N ¹⁾ (days)	1990s	E ²⁾	RCP4.5			RCP8.5		
			2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
1 ~ 2	150	1	161	135	156	198	199	217
		2	160	157	179	222	246	237
		3	161	171	154	233	237	229
		4	160	158	161	226	220	238
		5	168	177	179	214	214	249
		Avg.	162	160	166	219	223	234
3 ~ 7	202	1	182	184	189	32	32	34
		2	191	204	182	46	46	48
		3	190	203	214	41	40	42
		4	191	210	207	19	31	46
		5	203	188	202	41	33	43
		Avg.	191	198	199	36	36	43
8 ~ 14	78	1	78	82	95	1	1	-
		2	79	78	80	1	2	-
		3	75	67	71	1	1	2
		4	75	67	60	3	4	2
		5	66	76	64	1	1	-
		Avg.	75	74	74	1	2	1
15 ~ 21	14	1	16	18	9	-	-	-
		2	11	10	13	-	-	-
		3	17	9	12	-	-	-
		4	13	12	12	-	-	-
		5	11	9	13	-	-	-
		Avg.	14	12	12	-	-	-
22 ~ 28	4	1	1	6	1	-	-	-
		2	3	2	2	-	-	-
		3	3	5	3	-	-	-
		4	2	4	5	-	-	-
		5	2	2	5	-	-	-
		Avg.	2	4	3	-	-	-
29 ≤	0	1	1	1	-	-	-	-
		2	1	-	-	-	-	-
		3	1	-	-	-	-	-
		4	1	1	-	-	-	-
		5	2	-	-	-	-	-
		Avg.	1	-	-	-	-	-

1) N: Duration of non-precipitation event

2) E: Ensemble

4.2 저수지 물수지 분석 결과

4.2.1 유역 유출량

1990s 및 미래 기상자료와 각 저수지의 기초자료를 바탕으로 Tank 모형을 이용하여 유역의 유출량을 산정하였고 저수지 유입량으로 간주하였다. 2개의 RCP 시나리오와 5개의 앙상블 시나리오로 모의된 유량 모의 값을 3개의 전망구간으로 분리하여 30년 평균값을 막대그래프로 나타내었고, 현재 (1990s)와 비교하여 증감 변동을 선그래프로 표현한 결과는 Fig. 4.3과 같다. 각각의 시기별 앙상블에 따른 불확실성을 나타내기 위하여 30년 평균의 최대와 최소를 오차 막대로 표현하였다. Fig. 4.3에서 확인할 수 있듯이 유역 유출량의 변동 역시 강수량 변동 패턴과 유사한 형태를 보여주고 있고, 각 저수지별로 증가 비율도 10 % (RCP4.5; 2025s)에서 40 % (RCP8.5; 2085s)까지 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 또한 먼 미래 시점으로 갈수록 불확실성이 두드러짐을 확인할 수 있다.

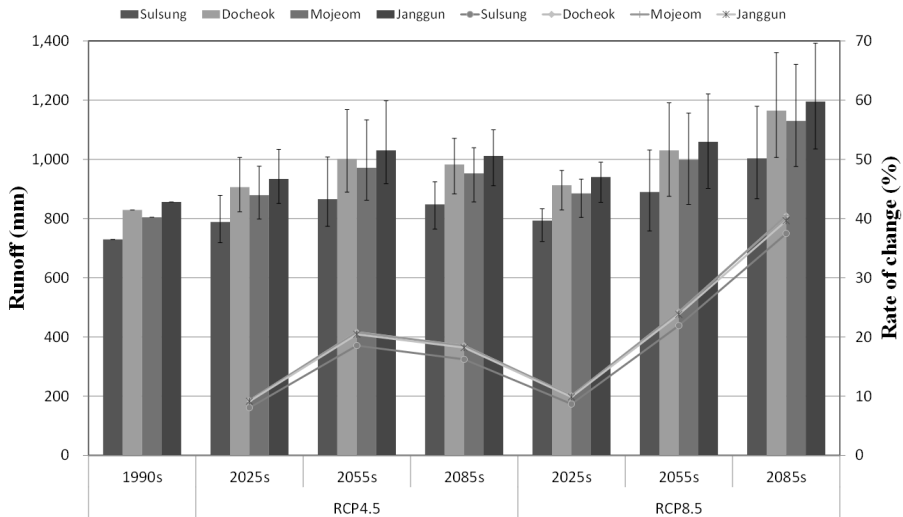
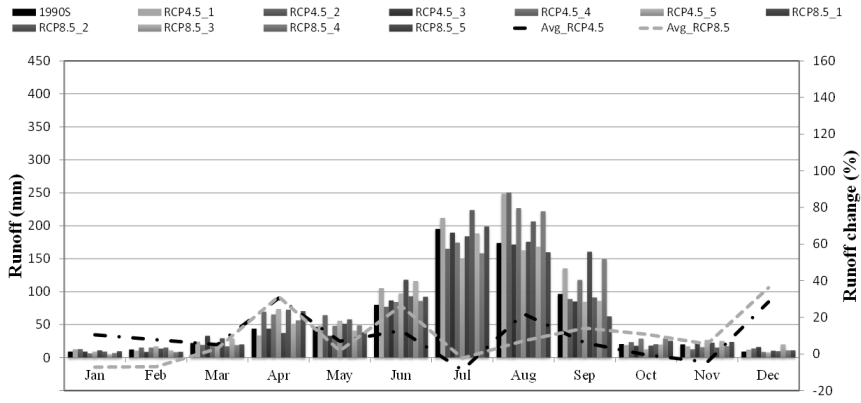
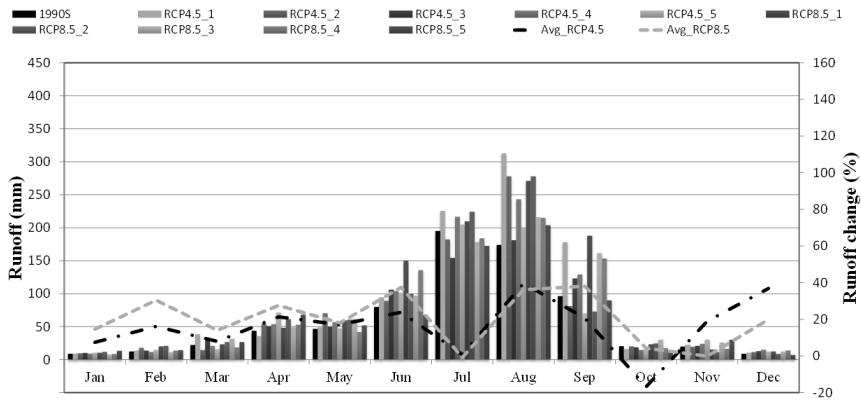


Fig. 4.3 Comparison of yearly runoff and change in yearly runoff comparing to 1990s data

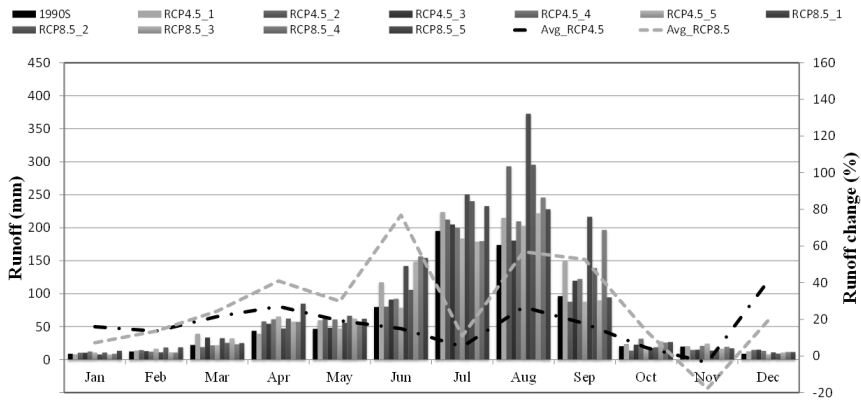
Fig. 4.4~Fig. 4.7은 설성, 도척, 모점, 장군 저수지의 월별 유역 유출량 전망을 나타낸 그림이다. 저수지별 유역 크기 및 산림비율에 따라 유출량 크기는 다르게 나타나지만, 현재대비 변화율은 비슷하게 나타났다. 1, 2월 및 10, 11월 비관개기에 현재보다 감소하거나 현재보다 작은 증가를 나타내는 경우가 많았으며, 홍수기이면서 관개기인 7월에 특히 눈에 띄는 감소 및 작은 증가할 것으로 전망되었다. 그러나 6월과 8월에는 먼 미래 (2085s)로 이동할수록 RCP8.5의 경우 현재대비 60 % 내외로 증가할 것으로 예상되었으며, 특히 8월의 경우 앙상블 시나리오에 따른 유입량의 차이가 큰 것으로 나타나 불확실성이 큼을 확인할 수 있다. 이러한 유역 유출량 즉 저수지 유입량의 예측결과는 앞서 분석한 미래 강수량 변동 추이와 유사성을 확인할 수 있다. 강수량 역시 1, 2월 및 7월, 11월에서 감소율이 두드러지며, 먼 미래로 이동할수록 앙상블에 따른 8월의 강수량 불확실성이 큰 것으로 전망된다. 향후 유역 유출량이 비관개기에 현재보다 감소한다면 여름철 홍수기에 유출량이 크게 증가하긴 하지만 농업용수 수요가 급격히 증가되는 그 다음해의 4월과 5월에 안정적인 용수공급에 큰 어려움이 있을 것으로 예상된다.



(a) 2025s

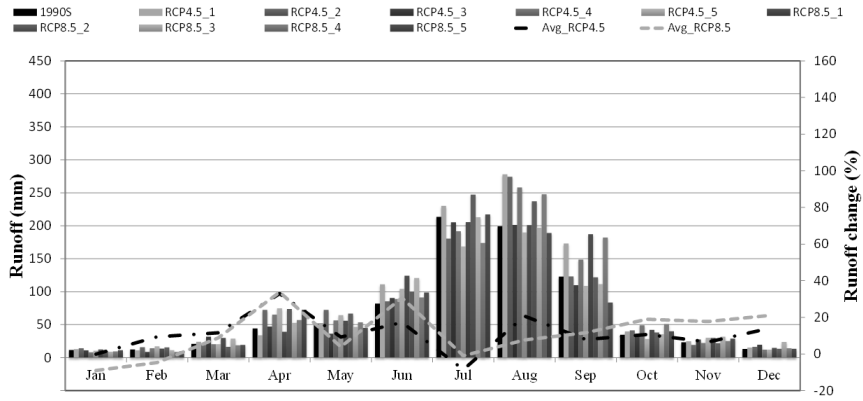


(b) 2055s

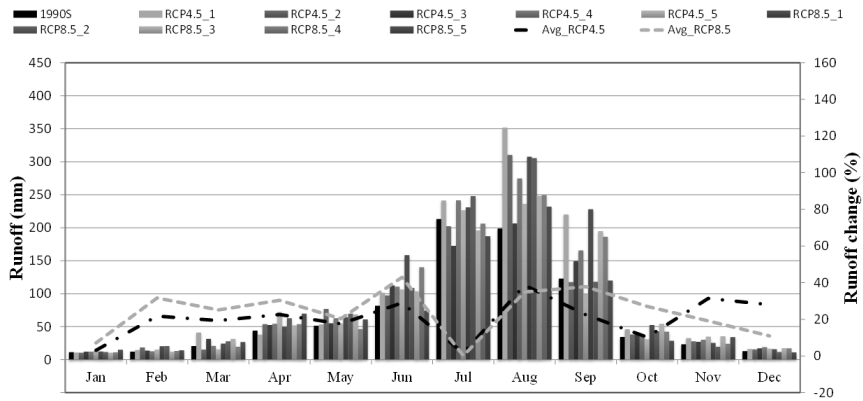


(c) 2085s

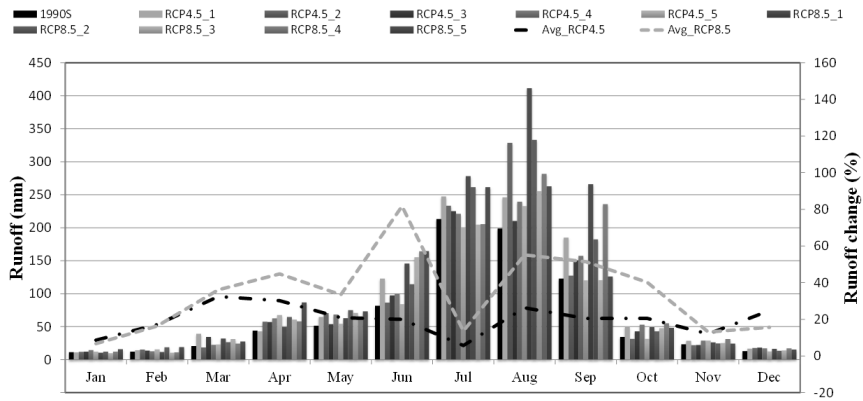
Fig. 4.4 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Sulsung reservoir)



(a) 2025s

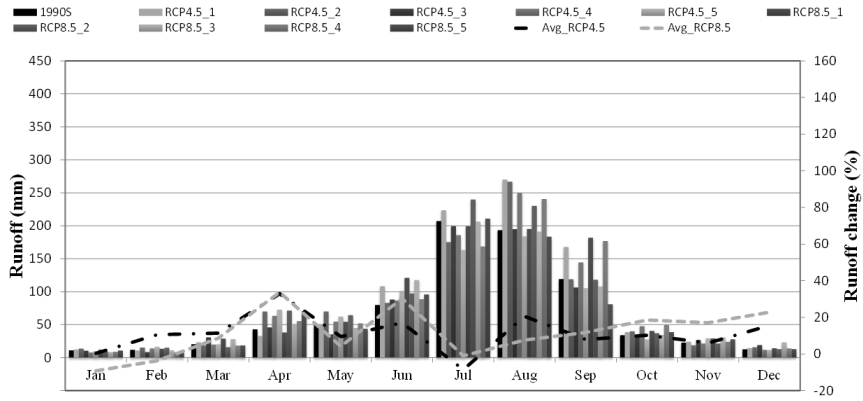


(b) 2055s

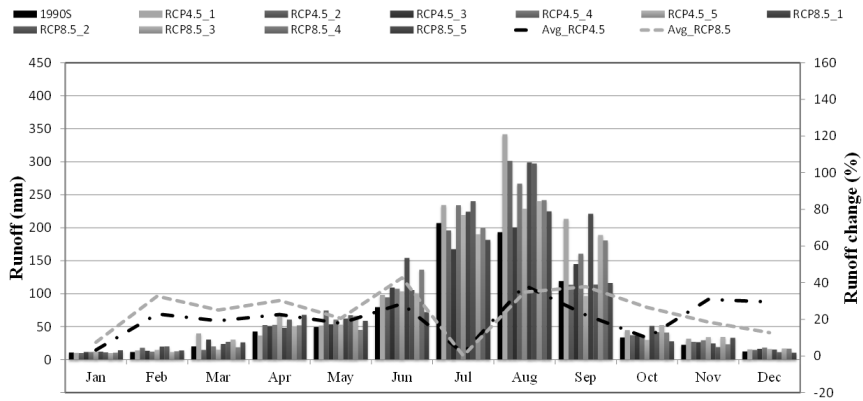


(c) 2085s

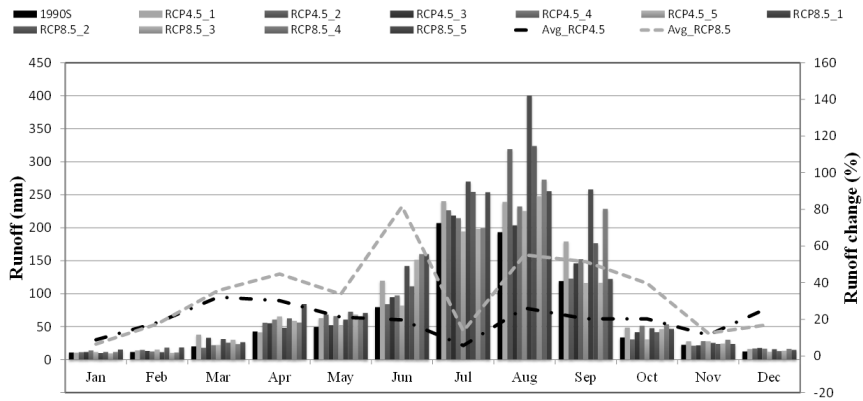
Fig. 4.5 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Docheok reservoir)



(a) 2025s

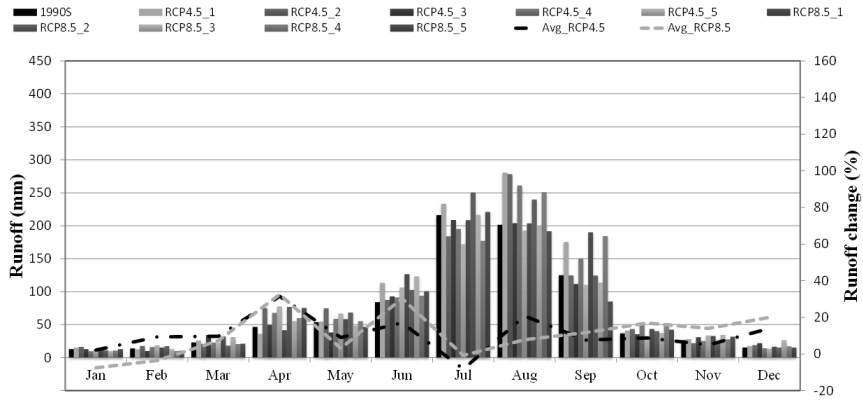


(b) 2055s

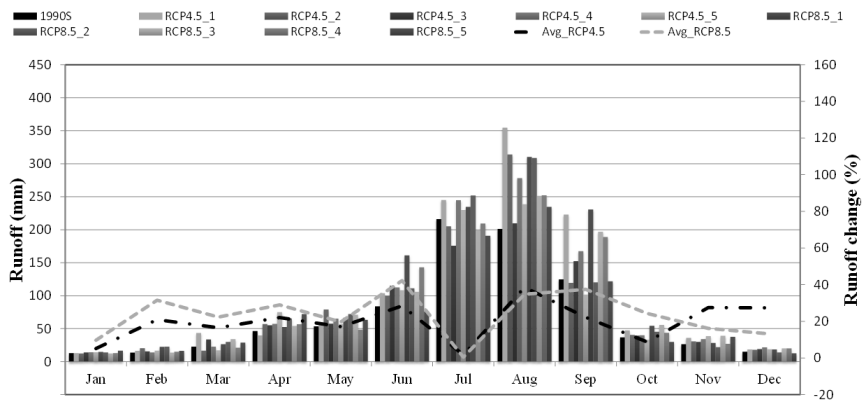


(c) 2085s

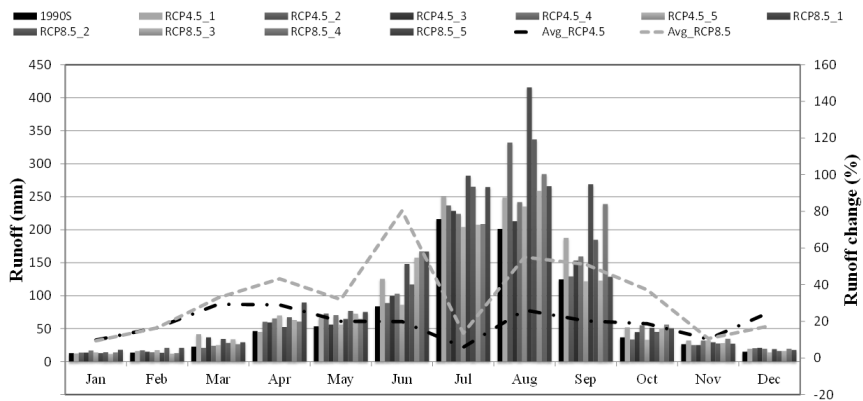
Fig. 4.6 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Mojeom reservoir)



(a) 2025s



(b) 2055s



(c) 2085s

Fig. 4.7 Comparison of monthly runoff and change in monthly runoff comparing to 1990s data (Janggun reservoir)

4.2.2 논벼 작물증발산량

Fig. 4.8은 Penman-Monteith 공식을 이용하여 기준작물증발산량을 산정한 후, 논벼의 작물계수를 활용하여 미래의 논벼 작물증발산량의 변화를 나타낸 것이다. 막대그래프는 30년 평균에 대한 앙상블 평균값을 표현한 것이고, 오차막대는 30년 평균에 대한 앙상블 최대값과 최소값이다. 현재 (1990s)의 논벼 작물증발산량은 679 mm이었으며, RCP4.5 시나리오에서는 시기별로 711 mm, 738 mm, 755 mm로 모의되었다. RCP8.5 시나리오의 경우 2025s에서는 711 mm, 2055s에서 761 mm, 2085s에서 811 mm로 지속적인 증가를 나타내었다. 앙상블 시나리오별 차이의 경우는 RCP4.5의 2055s에서 가장 작은 것으로 모의되었고 RCP8.5의 2085s에서 가장 큰 것으로 나타났으며, 현재기간과 비교하여 최대 22% 증가할 것으로 예상되었다. 논벼 작물증발산량은 기온변화에 따라 증감이 변화하기 때문에 이와 같은 결과가 나온 것으로 추정되며, 향후 기후변화에 따른 작물증발산량 증가가 필요수량과 관개용수에 미칠 영향 분석이 필요할 것이라 판단된다.

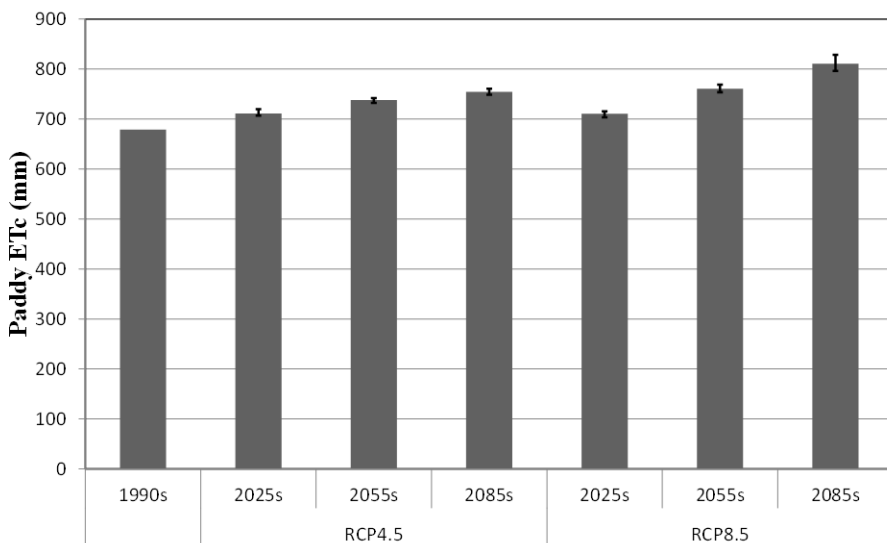


Fig. 4.8 The average of total paddy rice evapotranspiration (ETc)

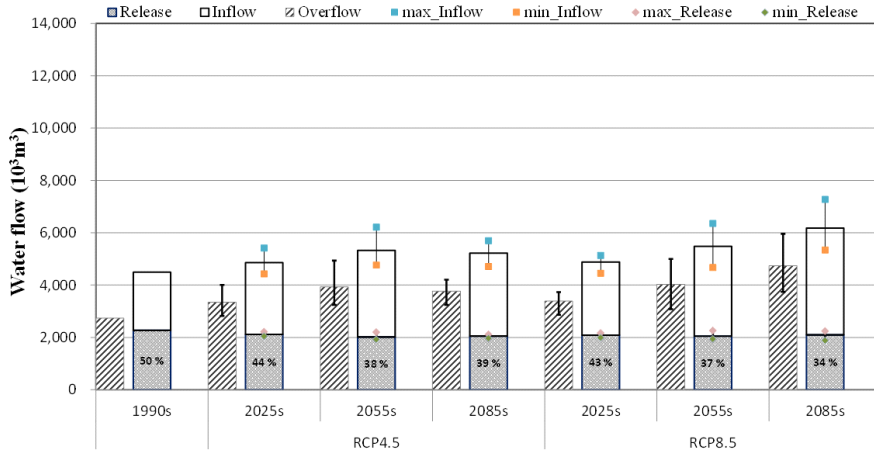
4.2.3 저수지 유입량 및 방류량 변화 분석

온실가스 저감 정책의 실현여부에 따라 기후시나리오가 설정되며, 그 기후시나리오를 바탕으로 하나의 GCM에서 발생 가능한 변화의 범위를 제시해 주는 앙상블 시나리오에 따른 미래의 저수지의 유입량 및 관개 지구의 필요수량을 공급하는 저수지 방류량과 만수용량을 초과하여 여수토를 통해 방류되는 유량인 무효방류량 산정 결과를 Fig. 4.9 및 4.10에 나타내었다. 막대그래프는 5개의 앙상블 평균이며, 오차막대는 앙상블에 따른 30년 평균값에서 최대와 최소를 나타내어 불확실성을 표현하였다. 또한, 장군저수지의 경우 유역면적이 다른 세 저수지의 비해 2배 이상 차이가 나기 때문에 y축 스케일을 달리하여 나타내었다.

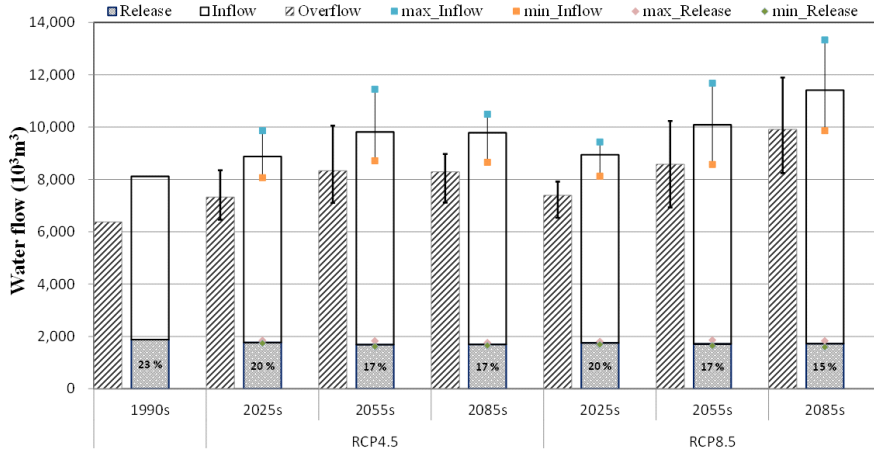
대상저수지 중 관개면적이 넓고 유역면적이 작은 설성은 (Fig. 4.9 (a)) 유역면적대비 관개면적이 1.8인 저수지로 현재 유입량의 50 %를 방류하고 있으며, 미래에 필요수량 증가보다 유입량의 증가가 클 것으로 전망되어 유입량대비 방류량 비율이 평균 34~44 %로 현재보다 감소할 것으로 분석되었다. 이는 단순 양적인 비교를 했을 때 저수지는 미래의 기후변화로 인해서 관개 논에 충분히 방류할 수 있는 긍정적인 효과를 나타낸다고 볼 수 있으나, 농업용저수지의 특성상 작물의 생육 단계에 따라 용수량이 상이하기 때문에 시기별 또는 실제 저수지의 수위에 따른 변화를 분석할 필요가 있다. 무효방류량은 현재 2,736.9 10^3m^3 으로 현재대비 미래에는 시기별로 RCP4.5에서 22 %, 44 %, 38%이었으며, RCP8.5에서는 24 %, 47 %, 73 % 증가하는 것으로 나타났다.

도척저수지 (Fig. 4.9 (b))와 모점저수지(Fig. 4.10 (a))는 현재기간 유입량대비 방류량이 각각 23 %, 25 %로 나타났으며, 이는 유역면적대비 관개면적이 각각 5.0과 4.8로써 유사하기 때문으로 사료된다. 미래에는 유입량대비 방류량 비율이 도척저수지는 평균 15~20 %, 모점저수지는 평균 16~21 %로 유사하게 감소하는 것으로 전망되었다. 도척저수지의 무효방류량은 현재기간에 6,383.5 10^3m^3 으로 현재대비 미래에는 RCP4.5의 경우 15~31 %, RCP8.5의 경우 16~55 % 증가하는 것으로 나타났다.

으며, 모점저수지의 무효방류량은 현재 5,526.0 10^3m^3 으로 미래에 14~55 % 증가하는 것으로 분석되어 증가율 또한 유사할 것으로 예측된다.



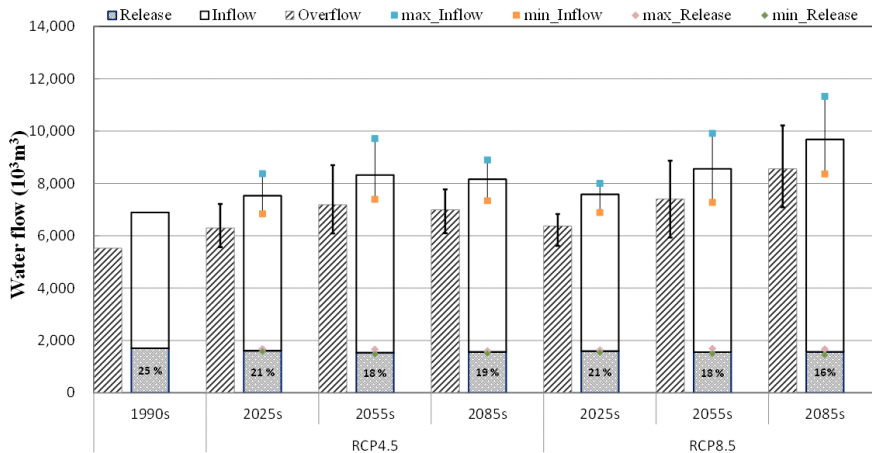
(a) Sulsung reservoir



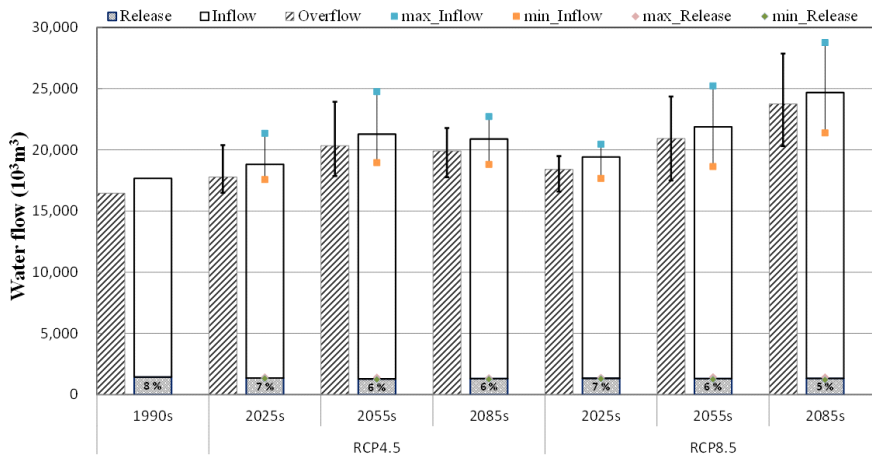
(b) Docheok reservoir

Fig. 4.9 Comparison of average yearly water flow (i)

장군저수지 (Fig. 4.10 (b))는 유역면적대비 관개면적이 11.0으로 현재 기간에 대하여 유입량 중 논에 공급하기 위해 방류되는 양은 8 %로 대상저수지 중 제일 작으며, 유입량대비 무효방류량은 현재 93 %에서 미래기간에 최대 96 %까지 증가할 것으로 나타나 이와 같은 저수지의 경우 관개지구의 안정적인 공급량이 확보되는 전제하에 농업용수를 다목적으로 활용하는 방안도 가능할 것이라 판단된다.



(a) Mojeom reservoir



(b) Janggun reservoir

Fig. 4.10 Comparison of average yearly water flow (ii)

4.3 미래시기의 극한가뭄 발생에 따른 저수지 대응 능력 평가

4.3.1 저수지의 가뭄심도 변화 분석

기후변화에 따른 농업가뭄심도의 변화를 분석하기 위하여 농업용수 주요 공급시설인 농업용저수지의 저수위를 기준으로 극한가뭄의 대응능력을 분석하였다. 이 때, 절단수준은 극한가뭄을 나타내기 위하여 사수위로 선정하였고, Fig. 4.11은 설성저수지의 지속기간에 따른 횡수를 나타낸 그림이다. 절단수준이 사수위이기 때문에 지속기간이 길어질수록 심도가 증가하는 의미를 가지기 때문에 가뭄심도 평가를 지속기간 중심으로 분석하였다.

1990s는 1976년부터 2005년까지 실측 기상자료를 활용하여 저수위를 모의하였고, 일 저수위가 사수위랑 같아지는 횡수가 총 50번으로 나타났다. (a)~(e)는 RCP 시나리오에 따른 시기별 결과를 도식해 놓은 것으로, 모든 경우에서 발생횡수는 최소 13번에서 최대 49번으로 현재보다 감소하는 것으로 산정되었다. 현재기간에서 가장 많은 부분을 차지하는 지속기간은 6~10일이며, 12번 발생하는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오에서 지속기간이 6~10일인 경우 횡수는 2025s에서 5번~9번, 2055s와 2085s에서 5번~10번으로 나타났으며, RCP8.5 시나리오에서는 2025s에서 5번~10번, 2055s에서 4번~13번, 2085s에서 1번~9번으로 나타나 현재보다 감소추세인 것으로 보여 진다. RCP4.5의 2025s에서는 모든 앙상블 멤버에서 지속기간이 짧은 1일 또는 3일이 많은 횡수를 차지했으며, 다른 시기에서도 전체적으로 단기 지속기간에서 증가 추세를 보였다. 반면에 20일 이상 지속기간이 나타나는 장기 지속기간은 RCP4.5의 2055s에서 앙상블 3 시나리오가 31일 이상 지속기간이 유지하는 것으로 모의되었으나 이 외에는 현재와 유사하거나 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 설성저수지는 기후변화로 인하여 극한가뭄에 대한 대응능력이 현재와 비슷하거나 더 향상될 것으로 추정할 수 있다.

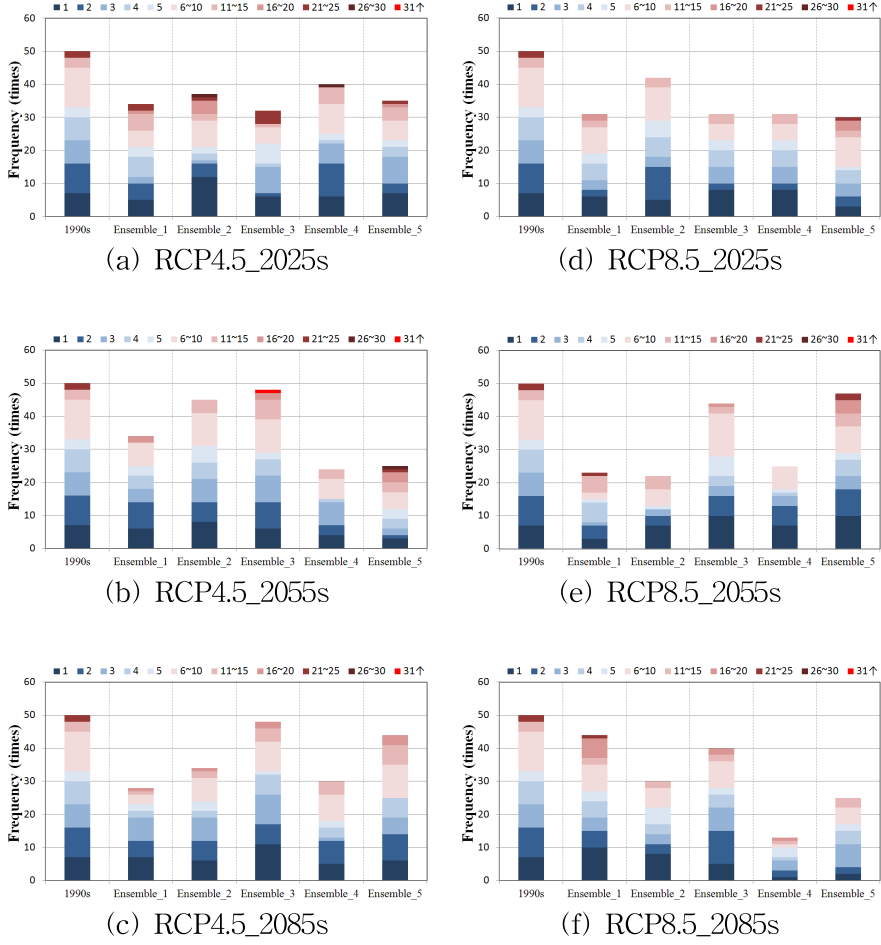


Fig. 4.11 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (D.W.L) in Sulsung reservoir

Fig. 4.12는 도척저수지의 RCP 시나리오에 따른 시기별 심도 변화를 나타낸 그림이다. 현재시기의 저수위가 충분한 수자원 확보가 되지 않아 사수위에 도달하는 횟수는 총 12번으로 나타났으며, RCP4.5에서는 2025s에서 11~17번, 2055s에서 9~20번, 2085s에서 3~19번이었고, RCP8.5에서는 2025s에서 8~19번, 2055s에서 2~17번, 2085s에서 3~23번으로 분석되었다. 시기별로 앙상블 멤버의 평균으로 살펴보면 RCP4.5 경우는 각각 14번, 15번, 12번으로 현재보다 횟수가 클 것으로 예상되었고, RCP8.5는 각 시기별로 13번, 9번, 10번으로 먼 미래로 갈수록 현재보다 용수공급 실패 현상이 줄 것으로 예측되었다. 지속기간에 따른 미래시기의 변화는 현재와 비교하여 단기간인 2, 3일 지속기간 및 중기간인 6~10일 지속기간이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 극한가뭄의 저수지 대응능력이 현재와 유사하거나 현재보다 떨어짐을 보여준다. 전반적으로 현재대비 미래시기의 총 횟수는 증가하는 경향을 보였으나, 앙상블 멤버별로 증감의 차이를 보임에 따라 다른 저수지에 비해 불확실성이 다소 크게 나타났다.

현재대비 가장 큰 횟수 증가를 나타낸 RCP8.5의 2085s에서 앙상블 1번 시나리오를 대표적으로 살펴보면, 유입량이 현재시기의 평균이 $8,119.7 \times 10^3 \text{m}^3$ 로 나타났으나 2071년, 2075년 및 2081년에 유입량인 유역 유출량이 $6,705 \sim 8,228.5 \times 10^3 \text{m}^3$ 로 모의되어 현재대비 온도 상승으로 필요수량이 증가했음에도 필요수량만큼의 수자원 확보 부족으로 사수위 발생이 증가한 것으로 나타났다. 또 다른 원인으로는 유입량의 편중에 따른 저수량 부족이다. 유입량의 전체 양이 현재보다 많이 증가하였고 또한 미래 30년 평균보다 큰 유입량이라 할지라도, 관개기 직전 또는 관개기 시작인 3, 4월부터 꾸준히 유입되지 않고 여름철 홍수기에 집중된다면 저수위 하락을 유발시킬 수 있다. 2098년에는 사수위 발생에 따른 지속기간 1일, 6일로 2번이 나타날 것으로 모의가 되었다. 이 때, 유입량의 변화를 살펴보면 4월말까지 유입량이 저수지에 유입되었으나 그 이후로 7월 초순까지 유역 유출량이 발생하지 않아 6월에 사수위가 발생하였으며, 7월 이후에는 저수위를 회복하는 것으로 예측되었다.

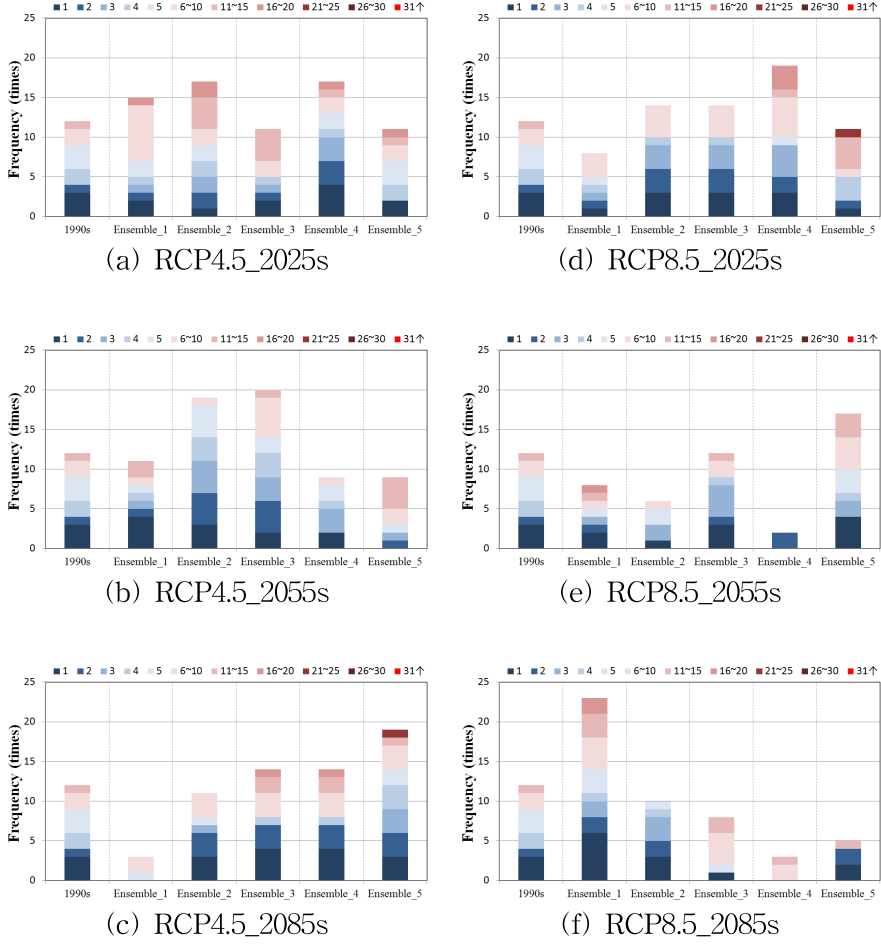


Fig. 4.12 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (D.W.L) in Docheok reservoir

저수위 변화에 따른 사수위 발생횟수의 증감에 따른 극한가뭄에 대한 저수지의 대응능력을 평가해보고자 하였으며, Fig. 4.13은 장군 저수지의 결과를 나타낸 그림이다. 장군저수지는 유역면적대비 관개면적 비율이 가장 큰 저수지로 현재시기의 사수위 발생은 총 2번 발생하였으며, RCP4.5의 2025s에서는 0~5번 (평균3회), 2055s에서는 0~5번 (평균2회), 2085s에서는 0~2번 (평균1회)로 먼 미래로 갈수록 감소하는 것으로 모의되었다. 현재 추세로 온실가스가 배출되는 시나리오는 RCP8.5의 경우 2025s에서는 0~6번 (평균3회), 2055s에서는 0~2번 (평균1회), 2085s에서는 0~6번 (평균2회)로 나타났으며, 전반적으로 단기 지속기간인 1 및 3일에 감소경향을, 중기 지속기간인 6일 이상은 증가경향을 보였다. 이는 현재와 유사한 가뭄 대응능력을 유지하거나 혹은 기후변화로 인한 대응능력이 떨어질 수 있음을 시사한다. 또한 총 사수위 발생횟수는 먼 미래로 갈수록 감소하지만 심도는 커질 수 있기 때문에 단계적인 가뭄대응 대책을 수립할 필요가 있다고 판단된다.

Fig. 4.14는 모점저수지의 사수위 발생 횟수 변화를 모의한 결과이다. 모점저수지는 유효저수용량대비 관개면적 비율이 가장 큰 저수지로, 현재시기에는 사수위 발생이 생기지 않는 용수공급 능력이 충분한 저수지이다. 미래시기에도 각 시기별로 특정 양상블 멤버에서만 사수위가 발생하는 것으로 모의되었으며, 이는 미래에도 현재와 같이 극한가뭄에 잘 대응할 것으로 예상되나 몇 개의 양상블만 사수위를 발생할 것으로 예측된 것처럼 불확실성이 클 수 있음을 보여준다. 사수위 발생에 따른 지속기간임 심도의 변화 양상을 살펴보면, 단기간인 1일 및 2일 뿐만 아니라 중기간인 11~15일 지속기간이 발생할 것으로 예상되었다. 기후변화로 인하여 강우의 전체적인 평균은 증가하지만 연도별 편차가 심하여 유입량의 편차 또한 크지만, 모점저수지는 사수위 발생이 생기지 않을 것으로 예측되지만, 미래의 불확실성으로 인하여 사수위 발생한다면 중기간의 가뭄 심도가 일어날 확률이 높으므로 현재 대응능력으로는 대처하지 못할 가능성이 있음을 나타낸다.

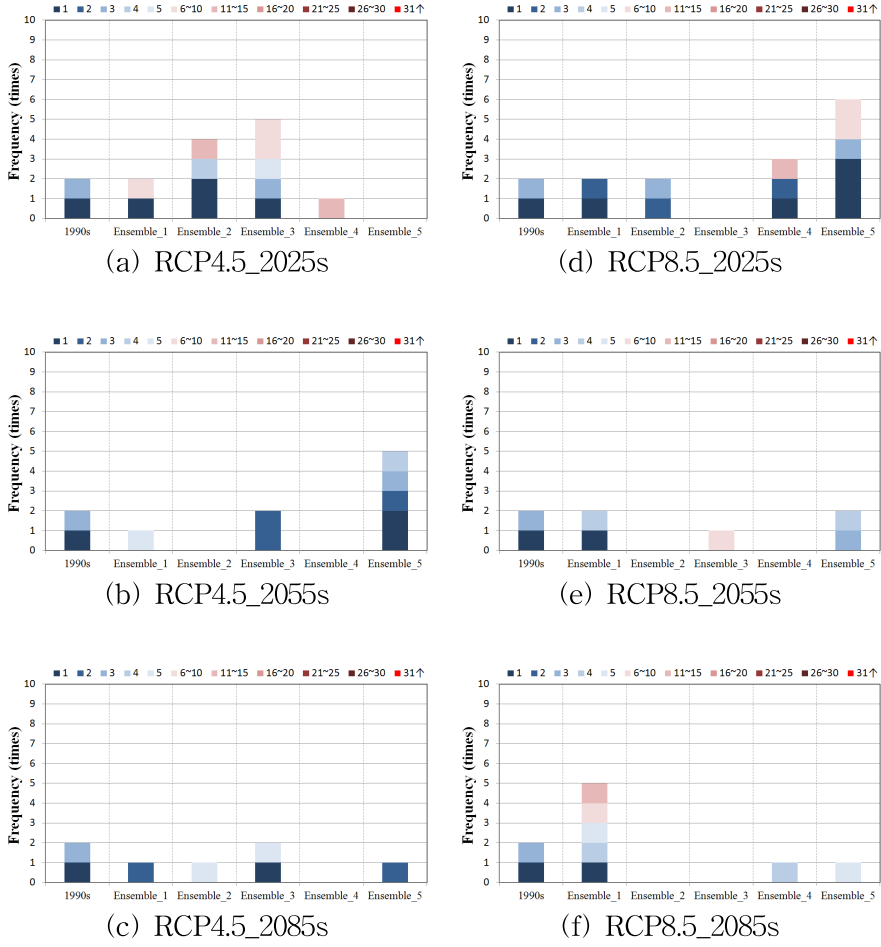
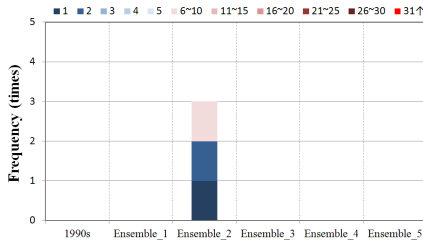
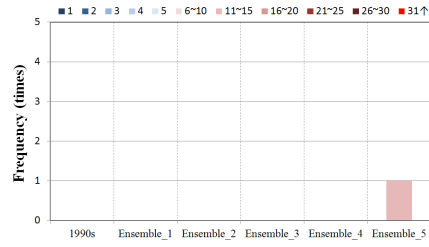


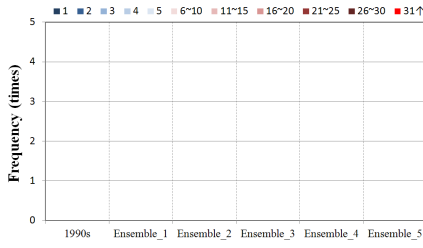
Fig. 4.13 Estimation of frequency dependent on duration by truncation level (D.W.L) in Janggun reservoir



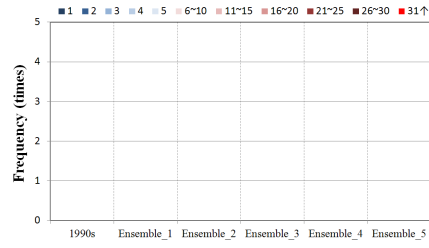
(a) RCP4.5_2025s



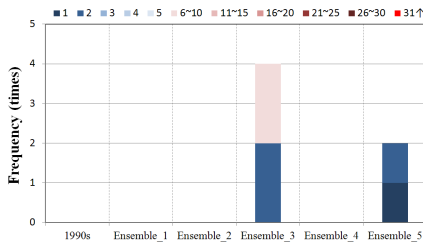
(d) RCP8.5_2025s



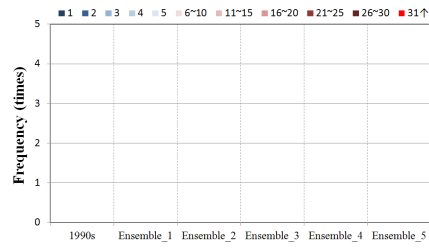
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



(c) RCP4.5_2085s



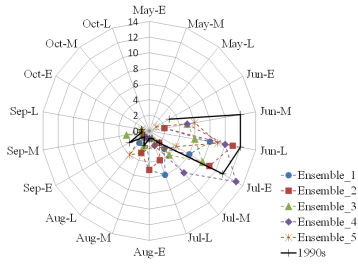
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.14 Estimation of frequency dependent on duration by truncation level (D.W.L) in Mojeom reservoir

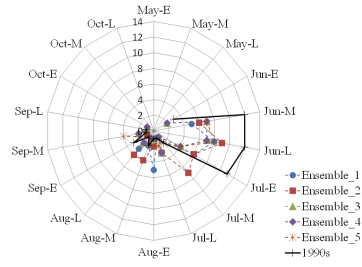
4.3.2 저수지의 가뭄 발생 시기 변화 분석

농업용 저수지는 관개지구의 논벼 생육시기별로 적정한 필요수량을 공급해 주면서 적정 저수위를 유지한다. 따라서 어느 시기에 극한 가뭄이 발생하느냐에 따라 농작물 생육 및 수확량에 직접적인 영향을 미치기 때문에 적정공급량 뿐만 아니라 공급 시기에 따른 평가가 필요하다.

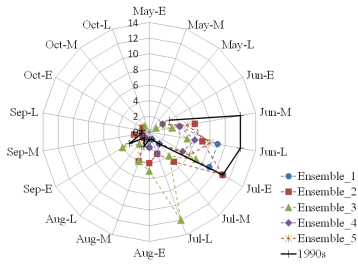
Fig. 4.15는 설성저수지의 사수위 발생이 일어난 횟수를 월별로 정리한 그림이다. 현재에는 6월 중순부터 9월 하순까지 분포했으며, 가장 큰 발생횟수를 나타낸 경우는 6월 중순 및 하순으로 12회씩이었다. 현재와 비교하였을 때 전반적으로 사수위 발생 횟수가 많았던 6월은 감소하는 경향을 나타내었고, 8월 및 9월에 발생하는 횟수가 증가하는 것으로 분석되었다. 현재대비 가장 큰 증가를 나타낸 RCP4.5의 2055s에서 앙상블 3 시나리오는 7월 하순에 12회 사수위가 발생할 것으로 나타났고, 이외에는 앙상블 멤버별로 유사하게 모의하는 것으로 이는 심도의 불확실성보다는 가뭄이 발생하는 시기에 대한 불확실성이 작은 것으로 판단된다. 또한 사수위가 발생하는 시기가 현재와 다른 양상을 보임에 따라 시기별 저수지 운영에 있어서도 대응책이 필요할 것이라 예상된다. 현재 6월 또는 7월에 사수위가 발생하는 원인으로는 5월부터 6월 사이의 강우량이 저수지 축조당시 계획했던 과거의 평균 강우량에 비해 20~30%에 불과하여 나타나는 경우가 대부분이었다. 그러나 미래에 사수위 발생 시기가 8월 또는 9월로 미뤄진다는 것은 우리나라의 장마철인 7~8월에 강우량이 충분하지 않아서이므로 불확실성을 감안해서 재해 단계별 대책 추진이 필요할 것이라 판단된다. 반면에 6월 또는 7월부터는 관개지구인 논에서 뿌리에 산소 공급 및 활력을 촉진하기 위하여 물관리 방법으로 중간물떼기 혹은 물걸러떼기 실시하기 때문에 저수지가 공급실패에 따른 피해는 적을 것으로 사료된다.



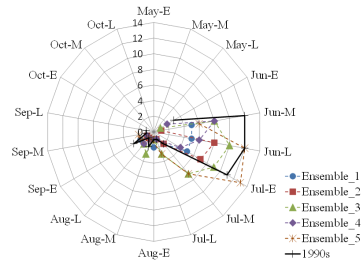
(a) RCP4.5_2025s



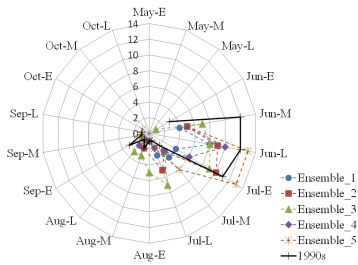
(d) RCP8.5_2025s



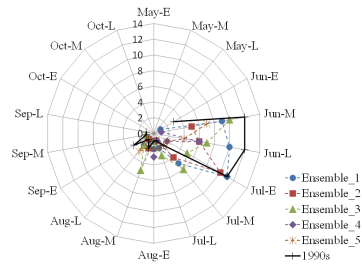
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



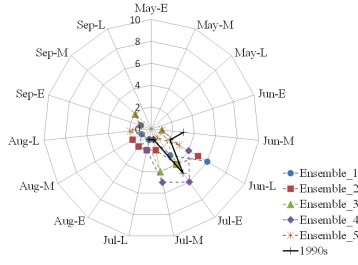
(c) RCP4.5_2085s



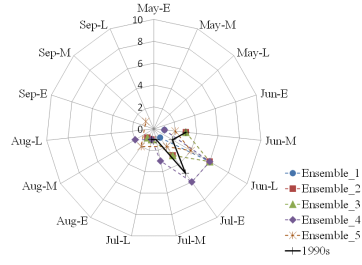
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.15 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (D.W.L) in Sulsung reservoir

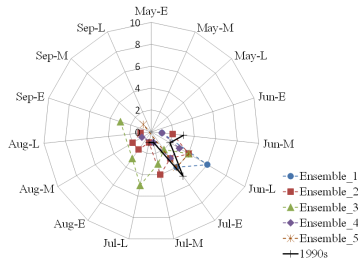
Fig. 4.16은 미래의 기후변화에 따른 극한가뭄이 발생했을 시 도척저수지가 대응하는 능력을 사수위를 기준으로 수위변화를 통해 검토하였으며, 사수위가 발생한 경우를 월별로 나타낸 그림이다. 현재시기의 사수위 발생은 6월 중순부터 7월말까지 분포했으며, 7월 초순에 5회로 현재에서는 가장 빈번하게 나타난 것으로 확인되었다. RCP 시나리오별로는 RCP4.5가 RCP8.5보다 사수위 발생횟수가 많았으며, 2055s에서 양상불 평균 5일 (RCP4.5) 및 3일 (RCP8.5)로 2025s보다 횟수가 감소하는 경향을 나타내었으나, 2085s에서 평균 6일 및 4일로 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 현재보다 사수위가 발생할 평균적인 값은 작아질 것으로 예측되나 양상불 멤버별 불확실성이 설성저수지보다 큰 것으로 보인다. 도척저수지도 설성저수지와 유사하게 현재시기에는 사수위 발생이 적었던 7월 하순부터 8월에 걸쳐 발생하는 횟수가 증가하는 것으로 모의되었으나, 도척저수지는 특히 6월에도 양상불 1번, 3번 시나리오가 현재보다 크게 증가할 것으로 분석되었다. 결과적으로 1990s보다 사수위 발생하는 시기가 앞당겨지지 않을 것으로 예상되었으며 전체적인 횟수는 감소경향을 나타내어 현재와 비슷한 수준의 극한가뭄의 대응능력을 유지할 것으로 보이나, 과거의 극한가뭄 이력을 검토하였을 때 그 피해가 다시 일어나지 않을 수 있도록 저수지 운영을 해야 한다.



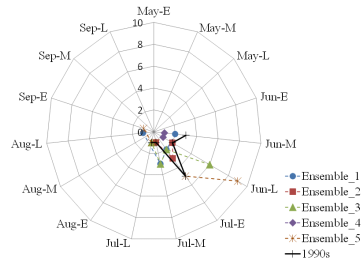
(a) RCP4.5_2025s



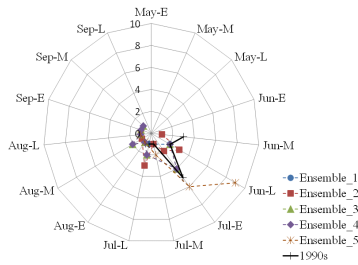
(d) RCP8.5_2025s



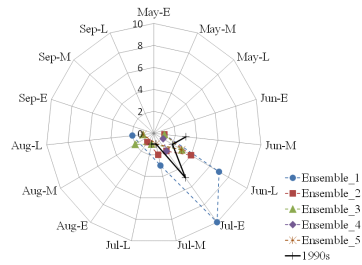
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



(c) RCP4.5_2085s

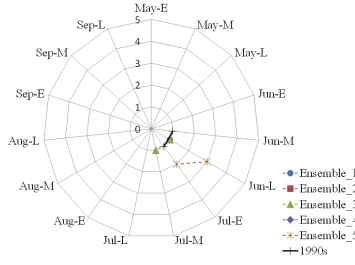


(f) RCP8.5_2085s

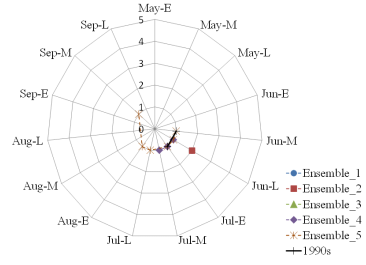
Fig. 4.16 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (D.W.L) in Docheok reservoir

Fig. 4.17 은 장군저수지에 대한 극한가뭄의 대응능력을 검토하기 위하여 절단수준을 사수위로 설정하고 발생하는 시기를 월별로 나타낸 그림이다. 장군저수지는 1990s에 6월 중순과 7월 초순에 각각 1회의 발생을 나타내어 다른 저수지에 비해 이론적인 한발 10년빈도에 가까운 저수지임을 표현할 수 있으며, 앙상블 멤버별로 불확실성은 존재하나 전반적으로 평균 횟수는 비슷하거나 감소하는 경향을 보였다. 총 발생 횟수가 많지 않기 때문에 발생하는 발생시기의 변화를 뚜렷하게 확인하기 어려우나, 미래시기에는 설성저수지와 도척저수지에 비해 8월, 9월에 사수위 발생은 적었고 1990s와 같이 6월과 7월에 사수위 발생 경향을 나타내었다.

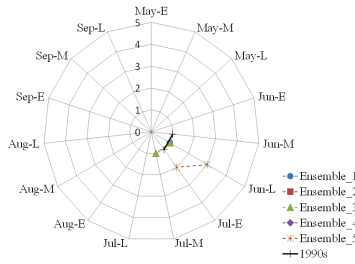
Fig. 4.18은 모점저수지의 사수위 발생하는 시기를 월별로 나타낸 그림이다. 모점 저수지는 1990s에 충분한 저수량 확보로 인하여 대상저수지 중 사수위 발생이 1회도 발생하지 않은 저수지로, RCP4.5의 2025s 및 2085s와 RCP8.5의 2025s에서 단 몇 개의 앙상블 멤버만 사수위가 발생할 것으로 예상되었다. 2025s의 경우 앙상블 2번 시나리오(RCP4.5)와 앙상블 5번 시나리오(RCP8.5)가 사수위를 모의하는 것으로 나타났지만, 그 시기에 다른 4개의 앙상블 시나리오가 사수위를 모의하지 않았기 때문에 사수위를 발생할 확률은 간단하게 1/5이라고 판단할 수 있다. 그러나 1990s에서는 사수위가 발생하지 않은 저수지이기 때문에 1회의 발생이 관개지구의 농업가뭄에 어떠한 피해 규모를 양상할지 모른다. 따라서 다른 대상저수지와 용수공급능력의 절대 비교가 불가능하다는 단점을 내포하고 있다.



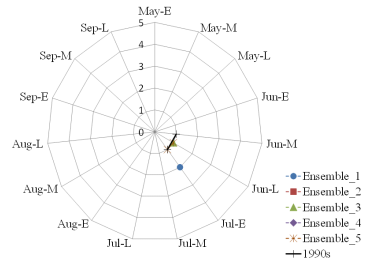
(a) RCP4.5_2025s



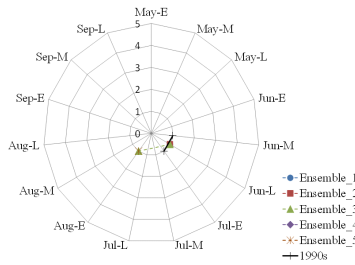
(d) RCP8.5_2025s



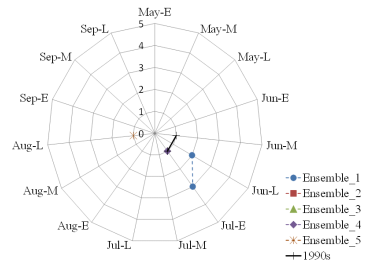
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s

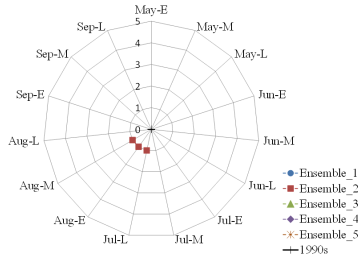


(c) RCP4.5_2085s

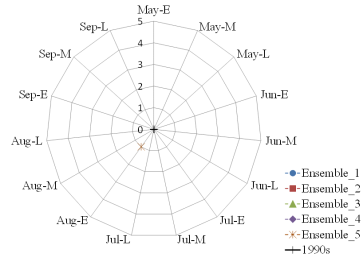


(f) RCP8.5_2085s

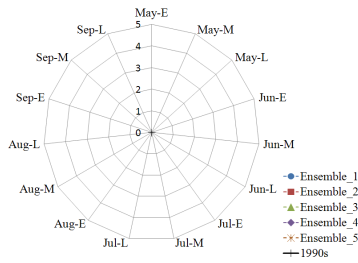
Fig. 4.17 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (D.W.L) in Janggun reservoir



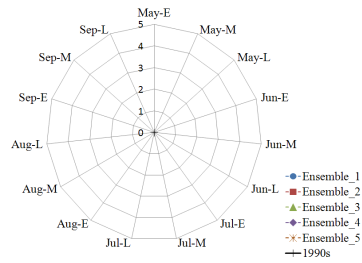
(a) RCP4.5_2025s



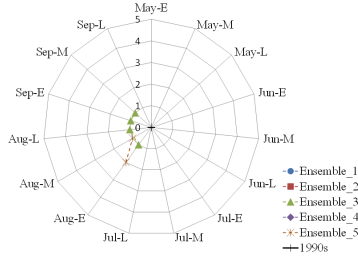
(d) RCP8.5_2025s



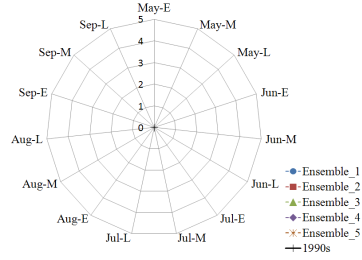
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



(c) RCP4.5_2085s



(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.18 Estimation of frequency dependent on drought occurrence by truncation level (D.W.L) in Mojeom reservoir

4.4 미래의 10년빈도 가뭄의 대응을 위한 저수지의 대응능력평가

4.4.1 10년빈도 수위 곡선 변화

가. 현재시기

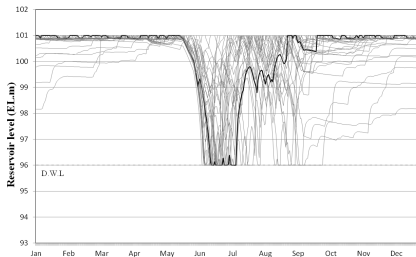
농업용 저수지는 10년 빈도의 가뭄에도 관개지구의 용수 수요를 충족시킬 수 있는 공급량의 규모로 설계하는 것이 일반적인 기준이며, 연최대 필요저수량의 빈도분석을 통해 산정된다. Table 4.5는 1976~2005년까지의 실측 기상자료를 활용하여 일별 모의 저수량으로부터 연최대 필요저수량을 산정하고 10년빈도 한발해를 선정한 결과이다.

가뭄발생 기록이 있는 1992년과 1995년이 선정되었으며, 설성저수지는 1,452 천m³, 도척저수지는 875 천m³, 장군저수지는 555 천m³, 모점저수지는 832.1 천m³로 매우 큰 필요수량이 발생하였다. 필요저수량이 경우 기본적으로 기상환경에 좌우되며 특히 관개기간 중 강우분포와 강우량의 부족과 밀접한 관계를 가지는데, 네 개의 대상저수지가 같은 기상자료로 모의된 저수량임에도 불구하고 유역면적이 넓고 관개면적이 좁은 장군저수지의 경우 한발해가 다르게 나타남에 따라 농업가뭄해석은 기상학적 가뭄과 다르게 분석해야 함을 시사한다.

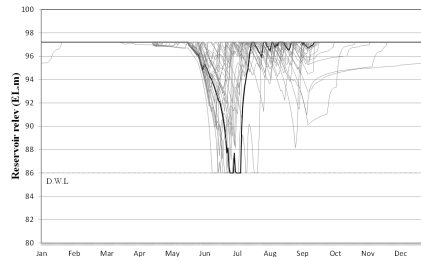
Table 4.5 Drought reference year for 10-year return period using 1990s data

	Sulsung	Docheock	Mojeom	Janggun
Drought reference year	1992	1992	1992	1995

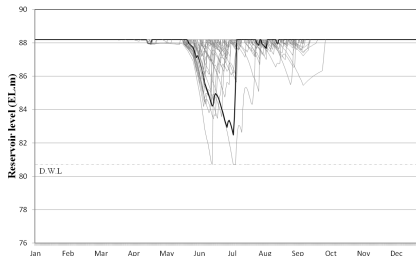
Fig. 4.19는 저수지 물수지 분석을 통하여 모의된 1990s의 일별 저수위를 나타낸 그림이며, 굵은선은 산정한 10년빈도 한발해의 수위를 표현한 것이다. 관개기 시작인 5월부터 논벼 생육에 필요한 용수를 공급함에 따라 저수위가 낮아지기 시작하며 7월부터 서서히 수위가 회복되는 패턴을 나타내었다. 설성저수지의 경우 30년 동안 사수위까지 내려가는 경우가 많이 생기기 때문에 10년빈도 저수위도 6월부터 7월까지 사수위에 있으며 특히, 12월까지 만수위로 회복되지 않아 그 다음해로 넘어가는 경우도 많았다. 도척저수지는 설성저수지보다 10년빈도 저수위가 사수위로 있는 기간이 짧았으며, 장군과 모점 저수지는 10년빈도 저수위가 사수위까지 내려가는 경우가 생기지 않았다. 현재 농어촌공사에서는 실시간 수위자료를 제공하고 있으며 설성과 도척저수지의 관측 수위와 비교해본 결과, 수위 변화의 경향성이 유사하게 나타나 현재 기상자료에 대한 수위를 적절하게 모의하고 있음을 보여준다.



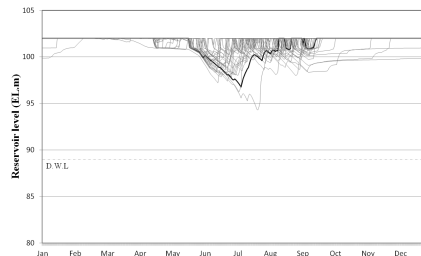
(a) Sulsung reservoir



(b) Docheok reservoir



(c) Janggun reservoir



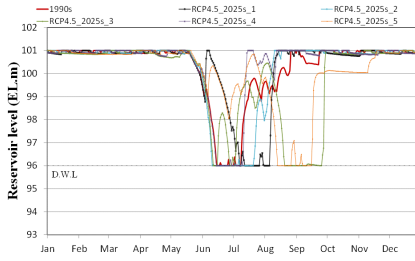
(d) Mogeom reservoir

Fig. 4.19 Daily reservoir level in 1990s

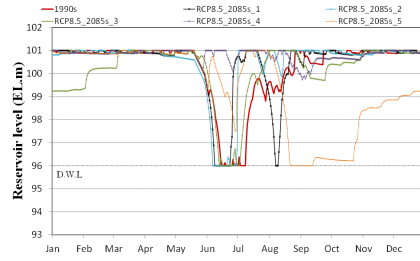
나. 미래시기

미래시기의 10년빈도 가뭄을 저수지가 대응하는 능력으로 저수위 변화를 분석하고자 미래 기상자료를 활용하여 모의한 일별 저수위를 빈도 분석하여 10년빈도 저수위를 산정하였으며 설성저수지의 결과는 Fig. 4.20과 같다.

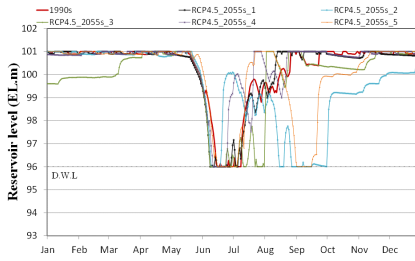
설성 저수지는 본 연구의 대상저수지 중 현재 10년빈도 저수위가 사수위로 내려가는 경우가 가장 많은 저수지로 현재에도 가뭄에 취약한 저수지이며, 미래에도 사수위로 저수위가 떨어지는 경우가 많이 생기는 것으로 모의되었다. 특히, 현재와 비교하였을 때 미래에는 수위가 회복되는 8월부터 10월 사이에 오히려 수위가 떨어지는 패턴을 보였다. 이는 시기가 비관개기이기 때문에 관개지구의 농업용수 공급에는 큰 문제가 없을 것으로 사료되나, 12월까지 만수위에 도달하지 않는다면 그 다음해의 용수공급에 피해를 줄 수 있는 위험성이 높아질 수 있다. RCP8.5는 강우의 증가가 두드러지는 시나리오임에도 불구하고 RCP8.5의 2085s에서 양상블 3 시나리오는 12월에 만수위까지 도달하지 못하는 것으로 예측되었으며, RCP4.5의 2055s 및 RCP8.5의 2025s에서는 양상블 3 시나리오가 1월부터 만수위로서 충분한 농업용수 확보가 되지 않는 것으로 모의되었다. 반면 관개시기에 저수위는 미래에 현재보다는 사수위로 떨어지는 횟수가 작아지는 것으로 보이니, 현재시기보다 사수위 부근으로 떨어지는 시기가 약 5일 정도 앞당겨지는 것으로 나타나 시기에 따른 대비가 필요할 것으로 사료된다.



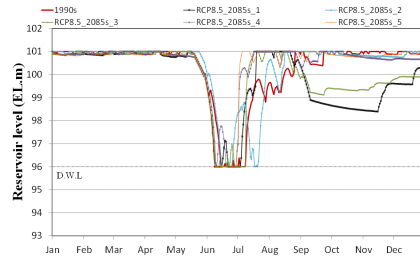
(a) RCP4.5_2025s



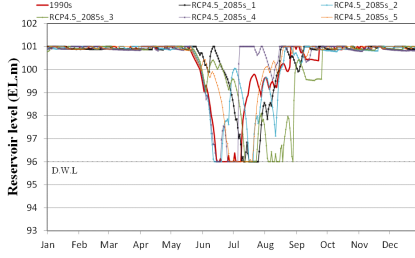
(d) RCP8.5_2025s



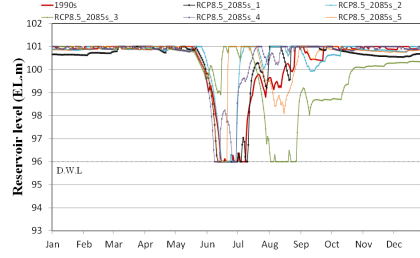
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



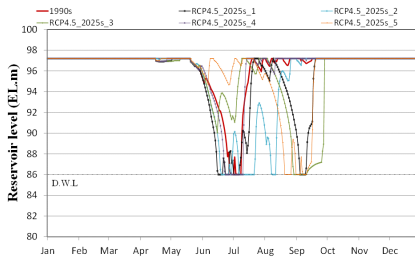
(c) RCP4.5_2085s



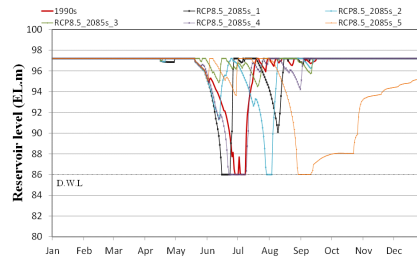
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.20 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Sulsung reservoir

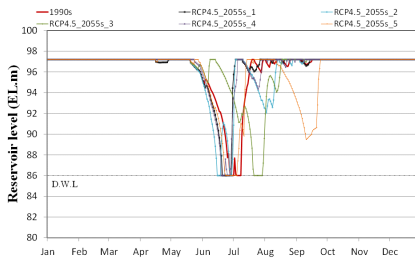
Fig. 4.21은 도척저수지의 미래시기에 대한 10년빈도 저수위를 나타낸 그림이다. 현재시기의 도척저수지 10년빈도 저수위는 본답기의 이앙이 시작하는 5월말부터 수위가 내려가기 시작하면서 7월초에 사수위까지 수위가 떨어졌다가 다시 수위가 상승하기 시작하고 8월에 만수위까지 수위가 회복된다. 현재와 비교하였을 때 미래시기에는 사수위까지 내려가는 시기가 8월부터 10월 사이에 나타났고, 또는 현재시기보다 약 5~10일 정도 앞서 사수위까지 내려갔다가 수위가 상승한 후 다시 사수위까지 수위가 떨어지는 것으로 모의되었다. 반면에 설성저수지와는 달리 12월까지 만수위까지 용수확보가 되지 않아 다음해 관개기에 영향을 줄 수 있는 경우가 RCP8.5의 2025s에서 앙상블 5 시나리오를 제외하고는 발생하지 않는 것으로 예측되어 장기간의 용수공급 실패에 대한 위험성은 적을 것으로 사료된다. 그러나 강수의 증가가 가장 클 것으로 예상되는 RCP8.5의 2085s에서도 10년빈도 가뭄에 대한 대응이 유사할 것으로 전망되어 강우의 양 뿐만 아니라 패턴 변화에 따른 기후변화 대책이 필요할 것이라 판단된다.



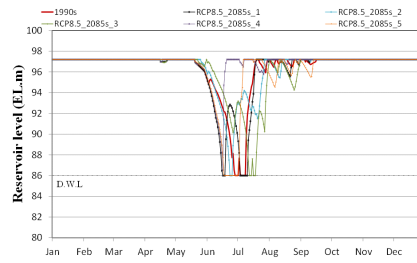
(a) RCP4.5_2025s



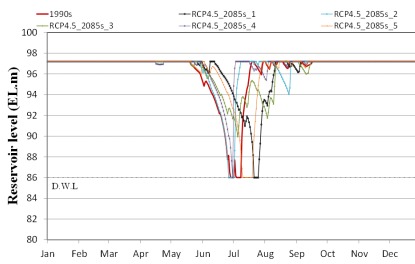
(d) RCP8.5_2025s



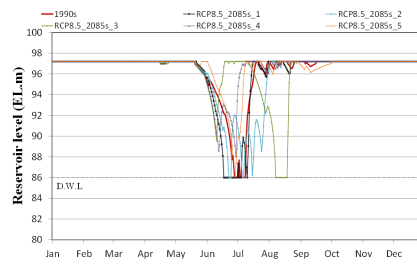
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



(c) RCP4.5_2085s



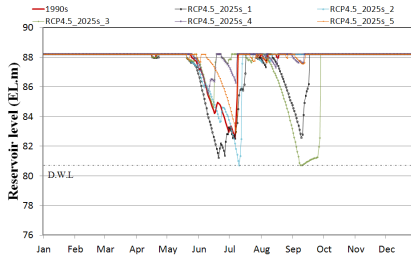
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.21 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Docheok reservoir

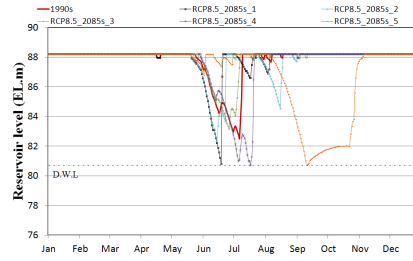
Fig. 4.22는 장군저수지가 10년빈도 가뭄이 발생하였을 때 대응하는 능력을 미래 시기별로 나타낸 그림이다. 장군저수지는 대상저수지 중 유역면적이 가장 크기 때문에 유역면적대 관개면적 비가 11.0으로 가장 크게 나타났고, 유효저수량이 작아 유역면적대비 저수량도 2.9로 가장 크게 산정되었다. 따라서 현재기준의 10년빈도 저수위는 사수위까지 내려가지 않고 관개기에 적절한 용수공급이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 미래에 기후변화로 인하여 10년빈도 저수위가 사수위까지 내려가는 경우가 발생할 것으로 모의되었다. RCP4.5의 2085s를 제외한 시기에 모두 발생하는 것으로 나타났으며, 특히 RCP8.5의 2025s에서는 총 3개의 앙상블 멤버가 사수위를 10년빈도 저수위로써 나타나는 구간이 있었고 다른 미래시기의 사수위 발생 구간이 6월 중순으로 빠르게 모의되었다.

Fig. 4.23은 모점저수지의 10년 빈도 저수위 변화를 나타낸 그림이다. 모점저수지는 유효저수량대비 관개면적이 8.3으로 대상저수지 중 가장 크게 나타나 현재시기의 10년빈도 저수위는 사수위까지 내려가지 않는 것으로 나타났고, 미래시기에도 대부분의 10년빈도 저수위가 사수위까지 떨어지는 경우가 없었다. 반면에 RCP4.5의 2025s에서 앙상블 2번 시나리오가 8월 중순에 사수위까지 내려가는 것으로 모의되어 용수공급의 실패가 일어날 수 있음을 나타내었고, 설성과 도척저수지와 유사하게 RCP8.5의 2025s에서 앙상블 5번 시나리오가 12월까지 만수위까지 용수 확보가 안되는 것으로 예상되었다. 따라서 모점저수지의 경우에는 10년 빈도 가뭄이 온다하더라도 유효저수량대비 관개면적이 크기 때문에 극한 기상현상이 오더라도 대응하는 가뭄대응능력이 큰 것으로 판단된다.

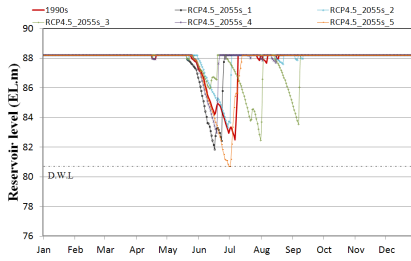
모점과 장군저수지는 10년빈도로 설계된 저수지로 10년빈도 가뭄이 와도 현재시기에는 대응능력이 큰 것으로 나타났다. 그러나, 기온과 강수량 증가가 예상되지만, 또한 강우패턴의 변화로 현재보다 가뭄에 대한 대응능력이 떨어지는 것으로 나타났다. 그러나 5개의 앙상블 멤버가 각각 다른 결과를 나타내었기 때문에 저수지의 효율적인 공급 계획 수립 시에 불확실성을 꼭 검토해야 할 것으로 판단된다.



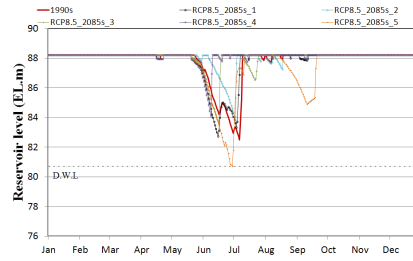
(a) RCP4.5_2025s



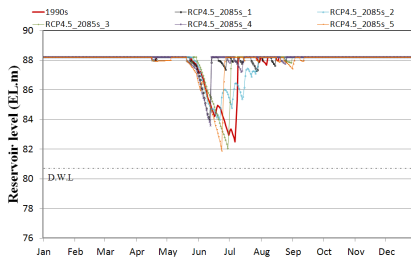
(d) RCP8.5_2025s



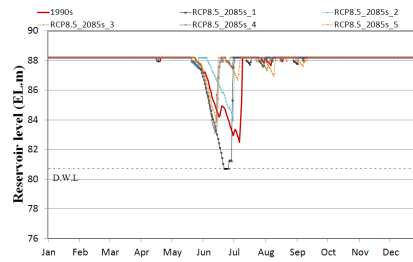
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s

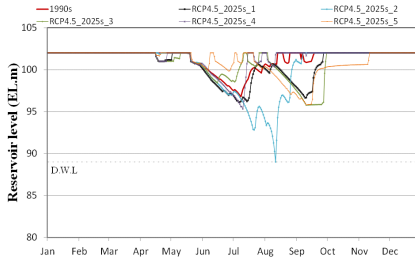


(c) RCP4.5_2085s

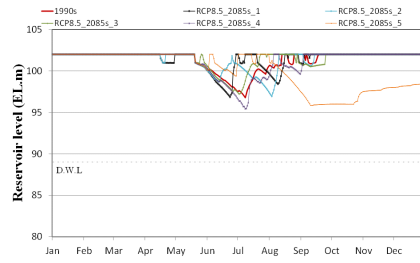


(f) RCP8.5_2085s

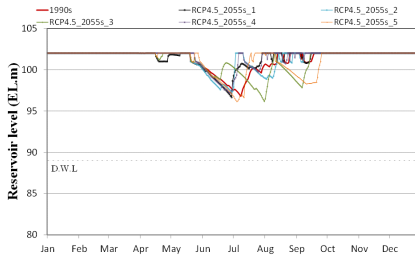
Fig. 4.22 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Janggun reservoir



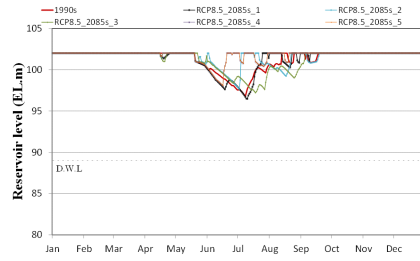
(a) RCP4.5_2025s



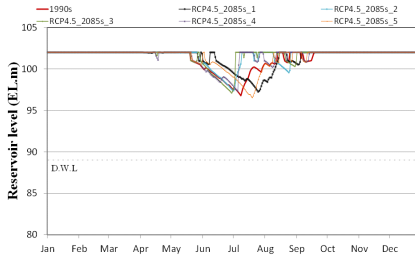
(d) RCP8.5_2025s



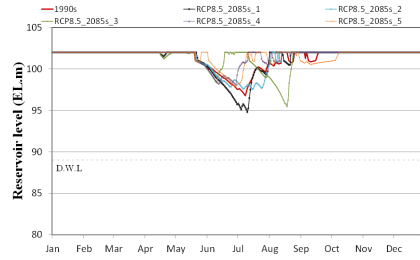
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



(c) RCP4.5_2085s



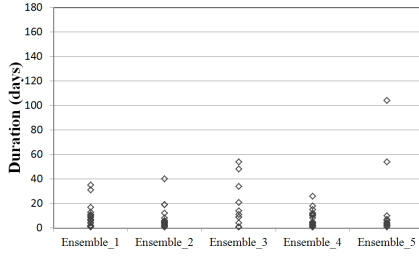
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.23 Estimation of daily reservoir level for 10-yr drought return period in Mojeom reservoir

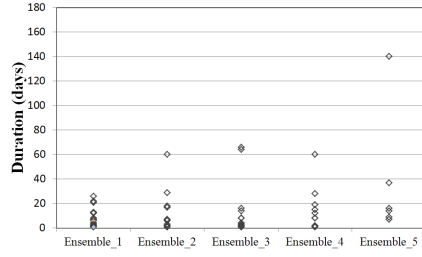
4.3.4 저수지 가뭄심도 변화 분석

관측 기상자료와 미래 기상자료를 활용하여 저수지 물수지 분석을 통해 도출된 연최대 필요저수량을 빈도 분석하여 계획기준년을 선정하고, 현재시기의 계획기준년 수위를 절단수준으로 설정하여 미래시기의 10년 빈도 저수위가 비교를 통해 저수지가 10년빈도에 해당하는 가뭄 대응 양상을 확인하고자 하였다. Fig. 4.24는 설성저수지의 결과를 도시한 것이다.

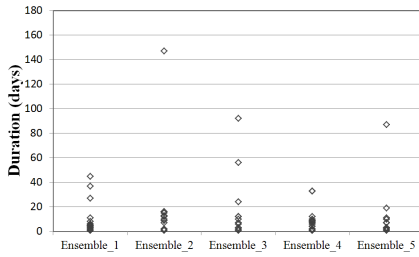
설성저수지의 현재 10년빈도 저수위보다 낮아지는 횟수는 앙상블 멤버 평균으로 RCP4.5의 2025s에서 18회, 2055s에서 16회, 2085s에서 19회였고 RCP8.5의 2025s에서는 13회, 2055s에서는 14회, 2085s에서는 13회로 나타났다. 미래시기의 10년빈도 저수위가 실측 기상자료로 모의된 현재 10년빈도 저수위보다 낮아져서 유지되는 지속기간인 가뭄심도는 RCP4.5의 2025s에서 앙상블 5번이 104일이었으며, 동시기에 RCP8.5에서도 앙상블 5번이 140일 지속하는 것으로 나타났고 전체적으로는 각각 26~104일과 26~140일로 확인되었다. 2055s에서는 1분위 값이 유사하게 산정되었고, 데이터의 75%를 나타내는 3분위값은 RCP4.5에서 6~15일, RCP8.5에서 4~23일로 RCP8.5가 지속기간을 더 길게 모의하였다. 가장 먼 미래 (2085s)는 RCP4.5에서 1분위값, 중앙값, 3분위값, 최대값 등이 2055s에서 보다 지속기간이 작아져 10년간 가뭄 대응능력이 2055s보다 좋아지는 것으로 예측되었으나, 온실가스 배출이 현재와 같은 경우의 시나리오인 RCP8.5에서는 강수량이 증가함에도 불구하고 최대값을 제외하고 나머지 분석 부분에서 증가 경향을 보였다. 앙상블 평균으로 분석하였기 때문에 최대값이 2055s보다 감소하는 것으로 나타났는데, 앙상블 3번에서는 160일 이상 지속하는 것으로 확인되었다.



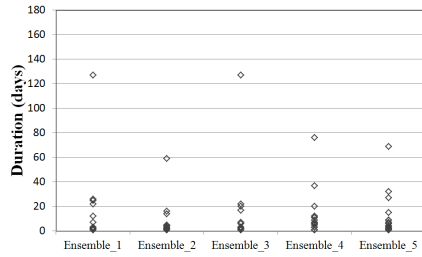
(a) RCP4.5_2025s



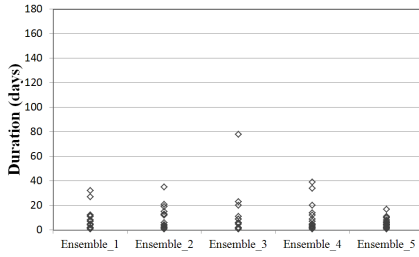
(d) RCP8.5_2025s



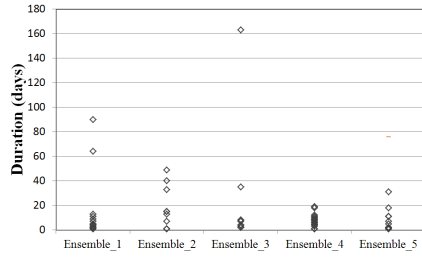
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



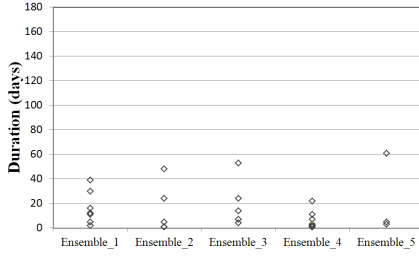
(c) RCP4.5_2085s



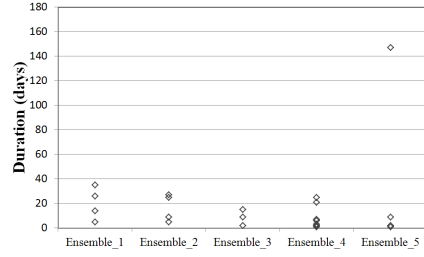
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.24 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (drought reference year) in Sulsung reservoir

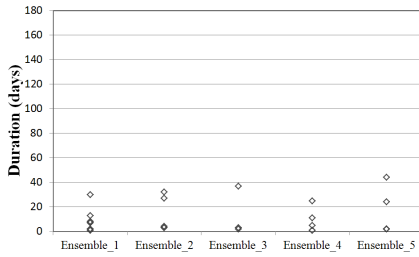
Fig. 4.25는 도척저수지의 현재의 10년빈도 저수위를 기준으로 미래의 10년빈도 저수위의 변화를 나타낸 것이다. 도척저수지의 현재 10년빈도 저수위보다 낮아지는 횟수는 앙상블 멤버 평균으로 RCP4.5의 2025s에서 6회, 2055s에서 5회, 2085s에서 4회였고 RCP8.5의 2025s에서는 5회, 2055s에서는 5회, 2085s에서는 5회로 나타났다. 미래시기의 10년빈도 저수위가 실측 기상자료로 모의된 현재 10년빈도 저수위보다 낮아져서 유지되는 지속기간인 가뭄심도는 중앙값을 기준으로 RCP4.5의 2025s에서는 3~14일, 2055s에서는 2~7일, 2085s에서는 1~12일로 나타났으며, RCP8.5에서는 시기별로 4~20일, 3~15일, 3~16일로 RCP8.5가 RCP4.5보다 발생횟수는 유사하나 지속기간은 길게 유지됨으로 분석됨에 따라 10년 가뭄 대응에 취약함을 나타내었다. 앙상블 평균으로 지속기간 최대값은 45일 (RCP4.5, 2025s), 34일 (RCP4.5, 2055s), 20일 (RCP4.5, 2085s)였으며, 50일 (RCP8.5, 2025s), 20일 (RCP8.5, 2025s), 28일 (RCP8.5, 2025s)로 예측되었고, 앙상블 멤버별로 각각 보았을 때 RCP8.5의 2025s에서 앙상블 5번이 147일 지속하는 것으로 예측되어 불확실성이 가장 클 것으로 예상된다.



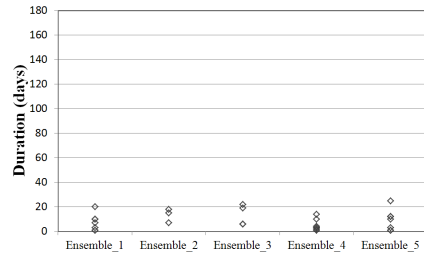
(a) RCP4.5_2025s



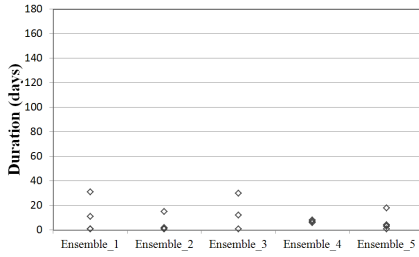
(d) RCP8.5_2025s



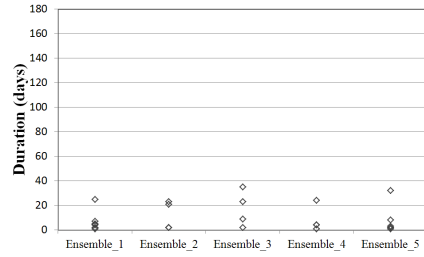
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



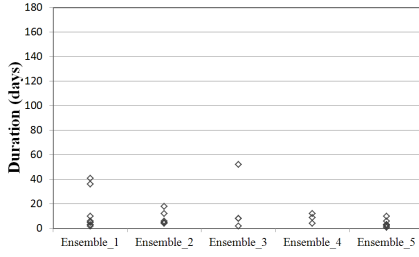
(c) RCP4.5_2085s



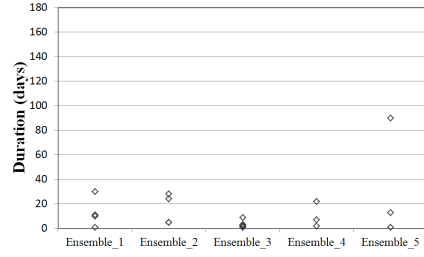
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.25 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (drought reference year) in Docheok reservoir

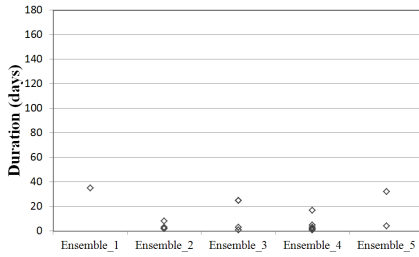
Fig. 4.26은 장군저수의 10년간 가뭄 대응에 따른 수위 변화를 현재시기의 10년빈도 가뭄과 비교하여 나타낸 그림이다. 앙상블 평균적으로 미래에 10년빈도 가뭄대응능력이 떨어지는 발생횟수는 RCP4.5에서 시기별로 5회, 3회, 4회로 나타났으며 RCP8.5에서는 4회, 4회, 4회로 각각 나타났다. 지속기간은 중앙값을 기준으로 RCP4.5의 2025s에서는 3~9일, 2055s에서는 3~35일, 2085s에서는 4~12일로 나타났으며, RCP8.5에서는 시기별로 3~15일, 3~36일, 2~7일로 현재에 비해 10년간 가뭄 대응에 취약함을 보였지만 먼 미래로 갈수록 작아지는 경향을 나타내었다. 반면에 지속기간 최대값은 앙상블 멤버별로 차이를 보였다. 앙상블 평균으로 지속기간 최대값은 27일 (RCP4.5, 2025s), 23일 (RCP4.5, 2055s), 22일 (RCP4.5, 2085s)였으며, 36일 (RCP8.5, 2025s), 25일 (RCP8.5, 2025s), 21일 (RCP8.5, 2025s)로 예측되어 RCP4.5와 8.5가 유사한 경향을 나타내었다. 앙상블 멤버별로 각각 보았을 때 RCP8.5의 2025s에서 앙상블 5번이 60일 지속하는 것으로 예측되어 불확실성이 가장 클 것으로 예상된다.



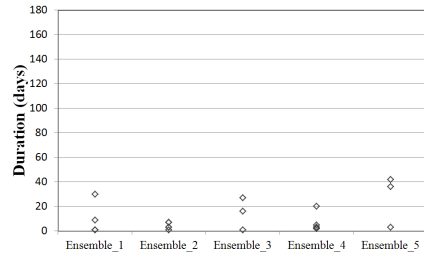
(a) RCP4.5_2025s



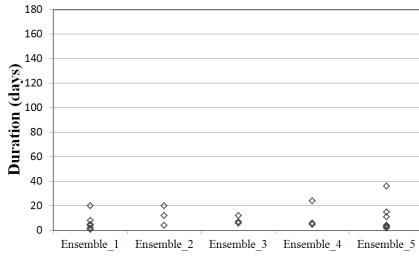
(d) RCP8.5_2025s



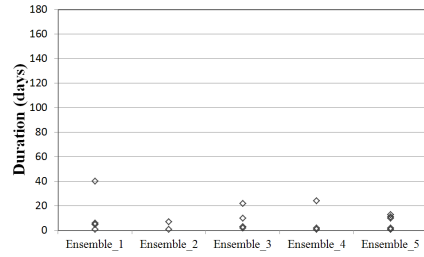
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



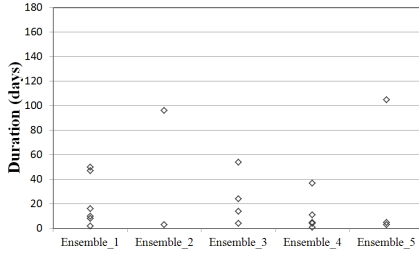
(c) RCP4.5_2085s



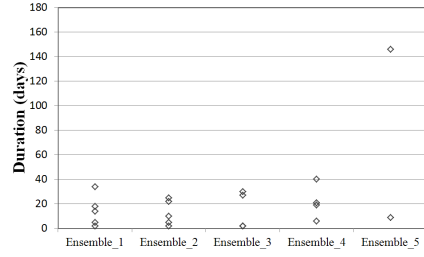
(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.26 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (drought reference year) in Janggun reservoir

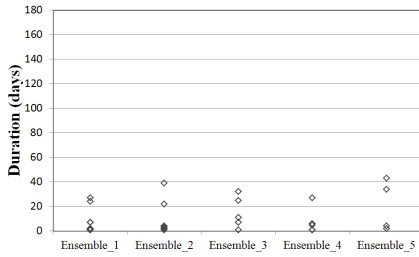
Fig. 4.27은 모점저수지의 현재의 10년빈도 저수위를 기준으로 미래의 10년빈도 저수위의 변화를 나타낸 것이다. 현재 10년빈도 저수위와 장군과 모점저수지가 유사한 형태를 보임에 따라 미래의 10년빈도 가뭄 대응도 유사한 모양 변화를 나타내었다. 앙상블 평균적으로 미래에 10년빈도 가뭄대응능력이 떨어지는 발생횟수는 RCP4.5에서 시기별로 4회, 6회, 5회로 나타났으며 RCP8.5에서는 4회, 4회, 4회로 각각 나타났다. 지속기간은 중앙값을 기준으로 RCP4.5의 2025s에서는 5~50일, 2055s에서는 2~19일, 2085s에서는 2~9일로 나타났으며, RCP8.5에서는 시기별로 10~77일, 3~31일, 1~19일로 현재에 비해 10년간 가뭄 대응에 취약함을 보였지만 먼 미래로 갈수록 작아지는 경향을 나타내었다. 반면에 지속기간 최대값은 앙상블 멤버별로 차이를 보였다. 앙상블 평균으로 지속기간 최대값은 68일 (RCP4.5, 2025s), 34일 (RCP4.5, 2055s), 21일 (RCP4.5, 2085s)였으며, 55일 (RCP8.5, 2025s), 25일 (RCP8.5, 2025s), 32일 (RCP8.5, 2025s)로 예측되어 RCP4.5가 8.5에 비해 가뭄 심도가 크게 분석되었으나 앙상블 멤버별로 각각 보았을 때 RCP8.5의 2025s에서 앙상블 5번이 146일 지속하는 것으로 예측되었다. 10년빈도 가뭄을 기준으로 하였을 때, 가까운 미래에 앙상블 멤버별 불확실성이 먼 미래의 불확실성 보다 클 수 있음을 나타낸다.



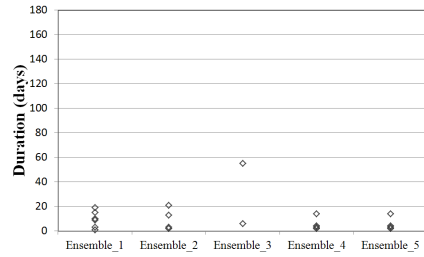
(a) RCP4.5_2025s



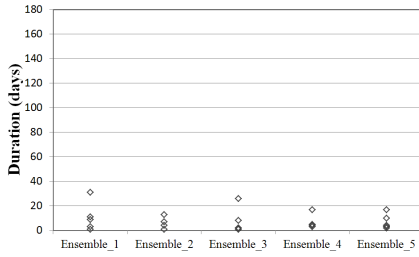
(d) RCP8.5_2025s



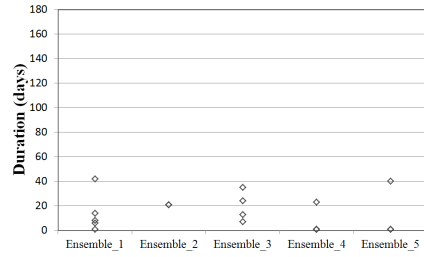
(b) RCP4.5_2055s



(e) RCP8.5_2055s



(c) RCP4.5_2085s



(f) RCP8.5_2085s

Fig. 4.27 Estimation of frequency dependent on drought duration by truncation level (drought reference year) in Mojeom reservoir

제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 우리나라의 농업용 저수지 가뭄대응 능력 변화를 분석하기 위하여 RCP 시나리오와 앙상블 멤버별 기상자료를 활용하였고, 저수지 물수지 분석을 통하여 저수량, 저수위, 필요수량 등을 산출하였다. 절단수준법을 적용하여 극한 가뭄 및 10년빈도 가뭄에 따른 저수지의 대응 능력을 확인하기 위하여 사수위 및 10년빈도 저수위를 절단수준으로 설정하였고, 이를 바탕으로 용수공급 실패의 심도와 발생 시기를 분석하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CCCma에서 제공하는 CanESM2의 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오와 앙상블 멤버를 활용하여 편의보정으로 상세화를 실시하였고 이를 바탕으로 일별 기상자료를 산출하였다. 산출된 결과 중 기온은 일 평균기온을 대상으로 RCP4.5에서 1.1°C (2025s)~ 3.0°C (2085s) 증가하는 것으로 추정되었고, RCP8.5에서는 1.5°C (2025s)~ 5.3°C (2085s) 증가할 것으로 예상되었다. 강수량은 RCP4.5에서 -0.3% (2025s)~ 32.4% (2055s)로 나타났고 RCP8.5에서는 0.0% (2025s)~ 49.9% (2085s) 증가할 것으로 모의되었다. 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우인 RCP8.5에서 기온과 강수량 모두 먼 미래로 갈수록 증가량이 크게 나타났으며, 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우인 RCP4.5 시나리오에서도 기온은 먼 미래로 갈수록 증가하였고 강수량은 2085s에서보다 2055s에서 큰 증가를 나타내었지만 전반적으로 현재보다 증가추세를 보였다. 따라서 온실가스 저감 정책뿐만 아니라 기후변화 대응 정책이 수립되어 탄력적으로 관리되어야 함을 나타낸다.

2. 미래 기상자료를 바탕으로 Tank 모형과 Penman-Monteith 공식으

로 유출량 및 논벼 작물증발산량을 산정하였다. 유역 유출량의 경우 대상 저수지들은 현재와 비교하였을 때 미래시기에 10 %에서 40 %까지 증가하는 경향을 나타내었고, 먼 미래로 갈수록 불확실성이 두드러짐을 확인할 수 있었다. 논벼 작물증발산량 또한 미래시기에 증가하는 경향을 보였고, 평균 증가 비율은 RCP4.5에서 4.7 %~11.2 %로 나타났고 RCP8.5에서 4.7 %~19.4 %로 나타나 기후변화에 따른 논벼 증발산량 변화보다는 유역 유출량의 변화가 더 큰 것으로 판단된다.

3. 미래 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오에 따른 농업용 저수지의 극한 가뭄 대응능력 평가를 실시하였다. 극한 가뭄 기상에 따른 저수지의 대응 양상을 보기 위하여 절단수준을 사수위로 설정하였으며, 지속기간과 발생 시기 중심으로 분석하였다. 설정저수지는 미래시기에 전체 발생횟수는 줄고, 현재시기에 많은 부분을 차지한 지속기간이 6~10일인 경우 횟수도 주는 것으로 나타났다. 도척저수지는 현재보다 미래시기에 사수위 발생횟수가 증가할 것으로 예측되었으며 단기간 (2, 3일) 지속기간과 중기간 (6~10일) 지속기간이 증가하는 경향을 보였는데, 이는 유입량의 시기 편중이 원인으로 유효저수용량이 다른 저수지에 비해 작아 유입량에 더 민감한 것으로 판단된다. 장군과 모점저수지는 현재시기에 2회 발생하거나 발생하지 않은 저수지로 양상별 멤버별로 상이한 결과를 나타내었지만, 전체적으로 현재와 유사한 가뭄대응을 할 것으로 예측되었다. 사수위 발생 시기 변화는 대상저수지 전반적으로 현재와 비교하여 8월에서 9월로 발생시기가 지연되는 것으로 나타났으며, 이는 논벼 이앙시기에 가장 많은 용수공급이 필요한 시기임을 감안할 때 기후변화의 긍정적 효과로 볼 수 있다. 그러나 우리나라의 장마철인 7~8월에 강수량 부족으로 발생하는 것이기 때문에 저수지 운영에 있어서 현재와 다른 양상을 나타낼 가능성이 있기 때문에 단계별 대응책이 필요할 것이라 사료된다.

4. 미래시기에 농업용 저수지의 설계빈도인 10년빈도 가뭄 대응 양상

을 전망하였다. 연최대 필요저수량을 빈도분석하여 기준계획년을 선정하였고 1992년과 1995년이 각각 선정되었다. 기준계획년의 저수위를 절단수준으로 미래시기의 10년빈도 저수위와 비교·분석 결과 저수위가 하락하는 양상이 8월 및 9월 이후로 지연됨에 따라 가뭄심도가 장기간 유지되는 것으로 나타났다. 또한 RCP8.5 시나리오의 2025s 경우, 양상블 5번이 100일 이상 가뭄 심도가 유지되는 것으로 예측되어, 가까운 미래이지만 다른 양상블 멤버와 차이를 보임에 따라 불확실성이 크게 나타났다. 5개 양상블 중 하나의 양상블 시나리오이지만, 모든 발생 가능한 경우를 대비하여 유연한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

5. 저수지의 유역면적, 관개면적, 유효저수량은 고정되어 있으며, 강수의 절대적 양 뿐만 아니라 시기적인 편차에 의해 저수지의 수위가 변화하기 때문에 기후 모델 및 RCP 시나리오 및 양상블 멤버별 상이한 결과가 도출되었다. 이를 활용하여 변화하는 기상에 따른 고정되어 있는 저수지의 형태학적 특징으로 미래에 가뭄대응 변화 경향성을 전망할 수 있을 것이라 사료된다. 즉, 설성저수지는 유역면적대비 관개면적이 1.8로 관개면적이 상대적으로 크지만 유효저수량이 미래 기후변화에 긍정적인 영향으로 작용하여 현재보다 가뭄대응능력이 커질 가능성이 있는 것으로 판단되며, 반면 도척저수지는 유역면적이 관개면적보다 5배 이상 크지만 유효저수량이 작아 현재보다 미래에 가뭄대응능력이 취약해질 수 있는 것으로 사료된다. 그러나 본 연구에서는 4개의 저수지를 대상으로 하였기 때문에 추후 다양한 저수지의 설정을 통한 보다 통합적인 평가가 필요할 것이라 판단된다.

미래 기후변화에 따른 기상 변동성이 농업용 저수지의 가뭄대응능력에 미치는 영향을 분석하였다. 미래 전망은 보정이나 검증이 가능한 실제 관측값이 없기 때문에 객관적인 정확도와 신뢰성을 확보하는 것이 현실적으로 불가하다. 그러나 앞으로 저수지의 장기적인 운용 계획 수립에 있어 기후변화는 반드시 고려되어야하기 때문에 불확실성을 줄이

려는 노력이 필요할 것이다. 본 연구에서는 이를 개선하고자 앙상블 멤버를 사용하였으나, 전적으로 단일 GCM에 의존적인 연구방법으로 한계를 개선해야 할 필요성이 있다. 또한, 미래시기의 토지이용변화에 따른 유역과 관개지구의 변화를 고려하지 못하였기 때문에 기상에 따른 시간적인 미래는 표현이 되었으나, 공간적인 측면에선 미래를 표현하지 못한 한계가 있다. IPCC 5차 보고서에서는 사회·경제 시나리오가 제공되기 때문에 이를 활용한다면 효과적인 미래대비가 가능할 것이라고 판단된다.

본 연구 결과는 향후 기후변화로 인한 농업용수 변화를 파악하고 전망함으로써 저수지의 효율적인 공급 계획 수립의 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강동현, 2007. 기후변화에 따른 금강유역의 수자원 영향평가. 서울대학교 석사학위논문.
2. 국립기상연구소, 2011. IPCC 5차 보고서를 위한 기후변화 시나리오 보고서. pp. 117.
3. 기상청예보국, 2012. 앙상블 예측. 손에 잡히는 예보기술, Vol. 17.
4. 김선주, 이광야, 강상진, 1998. 관개용저수지 용수공급지수(IRWSI)의 확률통계분석. 한국농공학회논문집, Vol. 40 (4), pp. 58-66.
5. 김선주, 이광야, 신동원, 1995. 관개용 저수지의 한발지수산정. 한국농공학회논문집, Vol. 37 (6), pp. 103-111.
6. 김초롱, 2013. 기후변화 정보를 반영한 미래 한반도 물수급 전망. 서울대학교 석사학위논문.
7. 김현영, 1988. 관개용 저수지의 일별 유입량과 방류량의 모의발생. 서울대학교 박사학위논문.
8. 김현영, 박승우, 1988. 관개용 저수지의 일별유입량과 방류량의 모의발생(I). 한국농공학회논문집, Vol. 30 (1), pp. 50-62.
9. 김현영, 서영제, 오수훈, 1996. 우리나라 가뭄 평가방법에 관한 연구. 한국관개배수논문집, Vol. 3 (1), pp. 20-31.
10. 남원호, 홍은미, 최진용, 2014. 미래 기후변화에 따른 농업용 저수지 용수공급의 불확실성. 한국농공학회논문집, Vol. 56 (2), pp. 11-23.
11. 농림부, 1998. 농업생산기반정비사업 계획 설계 기준 - 관개편 (기준 및 편람).
12. 농업기반시설관리시스템 (Rural Infrastructure Management System; RIMS), <http://rims.ekr.or.kr>, 한국농어촌공사.
13. 박근애, 안소라, 박민지, 김성준, 2010. SLURP 모형을 이용한 기후, 식생, 토지이용변화가 농업용 저수지 유역과 하천유역에 미치는 기여도 평가(II): 모형의 검·보정 및 적용. 대한토목학회논문집, Vol.

30 (2B), pp. 121-135.

14. 박기욱, 김진택, 주옥중, 이용직, 2006. 농업가뭄의 평가를 위한 가뭄 지수의 적용성 분석. 한국관개배수논문집, Vol. 13 (1), pp. 72-81.
15. 박나영, 최진용, 유승환, 이상현, 2013. RCP 시나리오 기반 농업용 저수지의 내한능력 평가. 한국농공학회논문집, Vol. 55 (3), pp. 13-24.
16. 박민규, 윤용남, 이동률, 1999. 저수지 용량결정과 용수공급능력평가를 위한 가뭄빈도공식의 적용. 한국수자원학회 1999년도 학술발표회 논문집, pp. 56-61.
17. 박민지, 신형진, 최영돈, 박재영, 김성준, 2011. 수자원 가용능력을 고려한 수문학적 가뭄지수의 개발. 한국농공학회논문집, Vol. 53 (6), pp. 165-170.
18. 박성우, 안재숙, 이기춘, 1982. 한발 기준년 재조정. 농업개발시험연구, 서울대 농업개발연구소.
19. 서승범, 2011. 기후변화를 고려한 물수급 전망기법의 개발 및 적용. 서울대학교 석사학위논문.
20. 안병기, 김태철, 정도웅, 1988. 농업한발지수 설정에 관한 연구. 한국농공학회논문집, Vol. 30 (1), pp. 31-37.
21. 유승환, 최진용, 이상현, 오윤경, 박나영, 2012. 고해상도 기후시나리오를 이용한 논용수 수요량 및 단위용수량의 기후변화 영향 분석. 한국농공학회논문집, Vol. 54 (2), pp. 15-26.
22. 유승환, 최진용, 장민원, 2006. 논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman 공식의 작물 계수 산정. 한국농공학회논문집, Vol. 48 (1), pp. 13-23.
23. 윤동균, 정상옥, 김성준, 2011. 기후변화가 논 필요수량에 미치는 영향. 한국농공학회논문집, Vol. 53 (4), pp. 39-47.
24. 이광야, 2000. 농업용수 수요량 산정 시스템 개발. 건국대학교 박사학위논문.
25. 이길성, 김상옥, 정은성, 2009. 저수유량의 빈도분석과 불확실성 산

- 정을 위한 가이드라인. 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단.
26. 이태석, 최진용, 유승환, 이상현, 오윤경, 2012. 기후변화 시나리오에 따른 미래 논벼의 소비수량 및 생산량 변화 분석. 한국농공학회논문집, Vol. 54 (1), pp. 47-54.
 27. 임혁진, 권형중, 배덕효, 김성준, 2006. CA-Markov 기법을 이용한 기후변화에 따른 소양강댐 유역의 수문분석. 한국수자원학회논문집, Vol. 39 (5), pp. 453-466.
 28. 장민원, 2000. 관개용 저수지에 의한 답작물의 농업가뭄분석 및 평가에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문.
 29. 정상옥, 2012. 대표농도경로 시나리오에 의한 한반도 주요 평야지역 논벼 소비수량 추정. 한국농공학회논문집, Vol. 54 (5), pp. 35 - 41.
 30. 정하우, 김선주, 김진수, 노재경, 박기욱 외4, 2007. 관개배수공학. 동명사.
 31. 최대규, 안재현, 조덕준, 김상단, 2010. 토양수분 확률밀도함수로 살펴본 가뭄발생에 대한 기후변화의 영향. 한국수자원학회논문집, Vol. 43 (8), pp. 709-720.
 32. 한국농어촌공사, 2013. 농업생산기반정비통계연보.
 33. 홍은미, 최진용, 이상현, 2009. LARS-WG를 이용한 기후변화에 따른 논벼 증발산량 산정. 한국농공학회논문집, Vol. 51 (3), pp. 25-35.
 34. Chylek, P., J. Li, M. K. Dubey, M. Wang, and G. Lesins, 2011. Observed and model simulated 20th century arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol. 11, pp. 22893-22907.
 35. Hisdal, H., L. M. Tallaksen, B., Clausen, E., Peters, and A. Gustard, 2004. Hydrological drought characteristics. In: Hydrological Drought - Processes and Estimation methods for streamflow and groundwater, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 139-182.

36. Ho, C. K., D. B. Stephenson, M. Collins, C. A. T. Ferro, and S. J. Brown, 2012. A source of additional uncertainty in climate change projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 93 (1), pp. 21–26.
37. IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basic*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
38. IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
39. Islan, MD. S., T. Aramaki, and K. Kanaki, 2005. Development and application of an integrated water balance model to study the sensitivity of the Tokyo Metropolitan area water availability scenario to climate changes. *Water Resources Management*, Vol. 19, pp. 423 - 445.
40. Korea Meteorological Administration (KMA), 2012. Web system tutorials for climate change scenarios.
41. Meigh, J., E. Tate, and M. McCartney, 2002. Methods for identifying and monitoring river flow drought in southern Africa. In: Van Lanen and Demuth (2002) – *Regional Hydrology: Vridging the Gap Between Research and Practice*, IAHS Publication, No. 274, pp. 181–188.
42. Minville, M., F. Brissette, S. Krau, and R. Leconte, 2010. Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka river system (Canada). *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 136 (3), pp. 376–385.
43. Park, G. A., H. J. Shin, M. S. Lee, W. Y. Hong, and S. J. Kim, 2009. Future potential impacts of climate change on agricultural

watershed hydrology and the adaptation strategy of paddy rice irrigation reservoir by release control. *Journal of the International Society of Paddy and Water Environment Engineering*, Vol. 7 (4), pp. 271-282.

44. Raje, D. and P. P. Mujumdar, 2010. Reservoir performance under uncertainty in Hydrologic impacts of climate change. *Advanced in Water Resources*, Vol. 33, pp. 312 - 326.
45. Tallaksen, L. M. and H. A. J. van Lanen, 2004. *Hydrological Drought-Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
46. Vicuna, S., E. P. Maurer, B. Joyce, J. A. Dracup, and D. Purkey, 2007. The sensitivity of California water resources to climate change scenarios. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 43 (2), pp. 482-498.
47. Wilks, D. S., 1995. *Statistical methods in the atmospheric science*. An introduction academic press. pp. 467.
48. Yoo, S. H., J. Y. Choi, W. H. Nam, and E. Hong, 2012. Analysis of design water requirement of paddy rice using frequency analysis affected by climate change in South Korea, *Agricultural Water Management*, Vol. 112, pp. 33-42.

Abstract

Analysis of Drought Response Ability for Agricultural Reservoirs using GCM Ensembles of RCP Scenarios

Park, Na-Young

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering

The Graduate School of Seoul National University

Agriculture is directly affected by climate change, and it is necessary to understand the impact of climate change on agricultural reservoirs which are the main water resources for paddy fields in Korea. It should analyzed the whole range of possible climate data in the future, because of the uncertainties in climate change scenarios. Thus, it is important to evaluate drought response ability (DRA) for agricultural reservoirs using GCM ensemble members. The objective of this study was to evaluate the impact of climate change on the DRA of agricultural reservoirs based on the Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios and ensemble members of CanESM2 (The Second Generation Earth System Model) provided by CCCma (Canadian Center for Climate Modeling and Analysis). The DRA was estimated using truncation level method, its criteria is dead water level and 10yr return period level. The four reservoirs (Sulsung, Docheok, Janggun, Mojeom) were selected considering reservoir characteristics. The temporal resolutions was 1990s, 2025s, 2055s, and 2085s (divided into 1976 ~

2005, 2011 ~ 2040, 2041 ~ 2070, and 2071 ~ 2100), respectively.

The frequency by dead water level in Docheok reservoir were increased, but the other reservoirs were decreased or similar relative to the 1990s period. Docheok reservoir was sensitive reaction to bias against runoff due to small effective storage capacity. The season occurred dead water level was delayed until September compare with 1990s period data. In case of 10yr return period level for truncation level, the results showed that duration was maintained with long-term according to a shift of aspect falling level.

These results could be utilized for agricultural reservoirs management future design criteria considering climate change impacts on paddy irrigation.

keywords : Agricultural reservoir, Climate change, RCP scenarios, Ensemble members, Truncation level method

Student Number : 2011-21270